



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**VYHODNOCENÍ PROVOZNÍCH DAT TEPELNÉHO
ČERPADLA**

EVALUATION OF HEAT PUMP OPERATION DATA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marie Charvátová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Bc. Marie Charvátová**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vyhodnocení provozních dat tepelného čerpadla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na analýzu provozních dat tepelného čerpadla využívaného pro vytápění rodinného domu. Na základě provedené analýzy budou identifikovány tepelné charakteristiky budovy. Vyhodnocením a porovnáním trendů jednotlivých parametrů budou navrženy optimální provozní parametry. Pozornost bude dále věnována významu akumulace v topném systému s tepelným čerpadlem a inovativním možnostem řízení tepelného čerpadla.

Cíle diplomové práce:

- 1) Uvést stručný přehled problematiky a parametrů tepelných čerpadel.
- 2) Provést analýzu provozních dat z konkrétní instalace TČ s cílem identifikovat tepelné chování budovy.
- 3) Na základě výsledků bodu 2 provést návrh upravení provozních parametrů TČ.
- 4) Konkretizovat přínos akumulátoru tepla a způsobu řízení tepelného čerpadla.

Seznam doporučené literatury:

DVORSKÝ, E. a HEJTMÁNKOVÁ, P. , Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 8073001187.

PAVELEK, M., Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 9788021443006.

KANDLIKAR, S., Masahiro, S. a DHIR, V., Handbook of phase change: boiling and condensation. Philadelphia, PA: Taylor, xlvii, 738 p., 1999. ISBN 15-603-2634-4.

KUPPAN, T., Heat exchanger design handbook. USA, New York: Taylor and Francis, 2000. ISBN 0-8247-9787-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou tepelných čerpadel jakožto zařízení využívajících nízkopotenciální teplo okolního prostředí pro vytápění objektů. V teoretické části práce jsou popsány jednotlivé druhy těchto zařízení, uvedeny zdroje nízkopotenciálního tepla a charakterizovány možnosti akumulace tepelné energie. Praktická část práce je zaměřena na zpracování a vyhodnocení provozních dat tepelného čerpadla vzduch/voda využívaného pro vytápění rodinného domu a posouzení významu akumulční nádrže v topném systému. Součástí práce je také návrh optimalizace řízení tepelného čerpadla.

Abstract

This diploma thesis deals with the issue of heat pumps as devices using low-potential heat of the surrounding environment for heating of buildings. In the theoretical part of the thesis there are described various types of these devices, the sources of low-potential heat and the possibilities of heat energy accumulation. The practical part of the thesis is focused on processing and evaluation of operational data of air/water heat pump used for heating of family house and assessment of importance of accumulation tank in heating system. Part of the thesis is also a proposal of optimization of heat pump control.

Klíčová slova

Tepelné čerpadlo, Topný faktor, Nízkopotenciální zdroj tepla, Akumulace tepelné energie, Vytápění

Keywords

Heat pump, Coefficient of performance, Low-potential heat source, Heat energy accumulation, Heating

Bibliografická citace

CHARVÁTOVÁ, Marie. *Vyhodnocení provozních dat tepelného čerpadla*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117330>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci s názvem *Vyhodnocení provozních dat tepelného čerpadla* vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Pospíšila, Ph.D. Veškeré použité zdroje informací a obrázků jsem uvedla v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 23. května 2019

.....
Bc. Marie Charvátová

Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala vedoucímu své diplomové práce panu doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za cenné rady, informace, připomínky a čas věnovaný odborným konzultacím. Ráda bych také poděkovala panu doc. Ing. Janu Fiedlerovi, Dr. za poskytnutá data a informace o jeho tepelném čerpadle, a dále společností TC MACH a E.ON. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat své rodině a všem blízkým za trpělivost a podporu během celé doby mého studia.

OBSAH

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | ÚVOD | 15 |
| 2 | TEPELNÁ ČERPADLA | 17 |
| 2.1 | Historický vývoj tepelných čerpadel | 17 |
| 2.2 | Princip kompresorového tepelného čerpadla | 19 |
| 2.2.1 | <i>Pracovní cyklus tepelného čerpadla</i> | <i>20</i> |
| 2.2.2 | <i>Výparník</i> | <i>20</i> |
| 2.2.3 | <i>Kompresor</i> | <i>21</i> |
| 2.2.4 | <i>Kondenzátor</i> | <i>22</i> |
| 2.2.5 | <i>Expanzní ventil</i> | <i>23</i> |
| 2.2.6 | <i>Chladiva</i> | <i>23</i> |
| 2.3 | Další typy tepelných čerpadel | 24 |
| 2.4 | Hodnocení efektivity tepelných čerpadel | 25 |
| 2.4.1 | <i>Topný faktor COP</i> | <i>26</i> |
| 2.4.2 | <i>Sezónní topný faktor SCOP</i> | <i>26</i> |
| 2.4.3 | <i>Značka kvality EHPA</i> | <i>27</i> |
| 3 | NÍZKOTEPLTNÍ ZDROJE | 29 |
| 3.1 | Vzduch | 29 |
| 3.2 | Půda | 31 |
| 3.2.1 | <i>Horizontální kolektory</i> | <i>33</i> |
| 3.2.2 | <i>Vertikální kolektory (geotermální vrty)</i> | <i>34</i> |
| 3.3 | Voda | 35 |
| 3.3.1 | <i>Podzemní voda</i> | <i>35</i> |
| 3.3.2 | <i>Povrchová voda</i> | <i>36</i> |
| 4 | BUDOVA A TEPELNÉ ČERPADLO | 37 |
| 4.1 | Vlastnosti budovy a topné soustavy | 37 |
| 4.1.1 | <i>Ekvitermní regulace</i> | <i>38</i> |
| 4.1.2 | <i>Ohřev teplé užitkové vody</i> | <i>38</i> |
| 4.2 | Provoz tepelného čerpadla | 39 |
| 4.2.1 | <i>Monovalentní provoz</i> | <i>39</i> |
| 4.2.2 | <i>Bivalentní provoz</i> | <i>39</i> |
| 4.3 | Akumulace tepelné energie | 40 |
| 4.3.1 | <i>Akumulace citelného tepla</i> | <i>40</i> |
| 4.3.2 | <i>Akumulace skupenského (latentního) tepla</i> | <i>41</i> |
| 4.4 | Dotace a dvoutarifová sazba elektrické energie | 41 |
| 5 | ANALÝZA PROVOZNÍCH DAT TEPELNÉHO ČERPADLA | 43 |
| 5.1 | Popis objektu | 43 |

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.2 | Charakteristika tepelného čerpadla..... | 44 |
| 5.3 | Poskytnutá naměřená data | 46 |
| 5.4 | Výpočet množství elektrické energie spotřebované tepelným čerpadlem | 47 |
| 5.4.1 | <i>Výpočet denní doby běhu kompresoru.....</i> | <i>47</i> |
| 5.4.2 | <i>Výpočet dle hodnot elektrického příkonu udávaných výrobcem.....</i> | <i>48</i> |
| 5.4.3 | <i>Výpočet dle denní spotřeby elektrické energie odečítané z elektroměru.....</i> | <i>50</i> |
| 5.5 | Výpočet topného faktoru COP | 51 |
| 5.6 | Výpočet množství tepla dodaného tepelným čerpadlem | 52 |
| 5.7 | Výpočet sezónního topného faktoru SCOP | 53 |
| 5.8 | Teplota vody v akumulční nádrži | 53 |
| 5.9 | Bivalence | 54 |
| 6 | OPTIMALIZACE ŘÍZENÍ TEPELNÉHO ČERPADLA | 57 |
| 6.1 | Výpočet optimální spotřeby energie tepelného čerpadla..... | 57 |
| 6.2 | Výpočet objemu akumulční nádrže | 59 |
| 6.3 | Ekonomické zhodnocení | 61 |
| 7 | ZÁVĚR..... | 63 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 65 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ | 71 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 73 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 75 |
| | PŘÍLOHA..... | 77 |

1 ÚVOD

Spotřeba energie vzhledem k technickému rozvoji společnosti, zvyšující se životní úrovni a růstu počtu obyvatel prakticky neustále roste. Většina využívané energie se v současnosti získává z neobnovitelných zdrojů energie, především fosilních paliv (uhlí, ropa, zemní plyn), jejichž těžba a zpracování představuje podstatnou zátěž pro životní prostředí. Zásoby těchto primárních energetických surovin nejsou neomezené, což vede k hledání nových alternativních způsobů získávání energie. Obnovitelné zdroje (sluneční záření, vítr, voda, biomasa atd.) jsou nejen prakticky nevyčerpatelné, ale zároveň produkují menší množství znečišťujících látek a jsou tedy i šetrnější k životnímu prostředí.

Myšlenka trvale udržitelného rozvoje je již několik desetiletí velmi diskutovaným tématem a zájem široké veřejnosti o environmentální problematiku a změnu klimatu stále stoupá. Nejen z ekologických, ale především pak z ekonomických důvodů roste v domácnostech zájem o alternativní způsoby získávání tepelné energie, neboť právě na vytápění a ohřev teplé užitkové vody (TUV) připadá asi 80 % [1] celkové spotřeby energie domácností ČR. V důsledku zvyšování cen tepla se stále více zákazníků odpojuje od teplotní sítě a přiklání se k tzv. decentralizovanému zásobování teplem, při němž odpadá potřeba dopravy a rozvodu tepla. Lokálními zdroji tepla mohou být např. zařízení na spalování biopaliv, fototermické kolektory či v současnosti hojně využívaná tepelná čerpadla.

Tepelná čerpadla (TČ) lze zařadit mezi alternativní zdroje energie, jelikož využívají nízkopotenciální teplo okolního prostředí (vzduch, voda, půda). Jedná se o zařízení, která jsou schopna po dodání určitého množství energie převést teplo z těchto zdrojů na využitelnou teplotní hladinu. Pro majitele nízkoenergetických domů jsou tepelná čerpadla i přes vyšší počáteční investici ideálním řešením zdroje tepla, neboť zajišťují nezávislost na velkých dodavatelích, šetrnost k životnímu prostředí a podle výrobců během několika let i úspory v domácnosti.

Tématem tepelných čerpadel se blíže zabývá i předkládaná diplomová práce, jejímž cílem je obecně shrnout problematiku TČ, a především pak analyzovat provozní data z konkrétní instalace TČ vzduch/voda. Pozornost je také věnována významu akumulární nádrže v topném systému s tepelným čerpadlem. V neposlední řadě je proveden návrh optimalizace řízení tepelného čerpadla za účelem snížení spotřeby elektrické energie.

2 TEPELNÁ ČERPADLA

Tepelné čerpadlo je obecně chápáno jako zařízení, které převádí nízkopotenciální teplo z okolního prostředí na teplotní úroveň využitelnou v praxi, např. pro vytápění či ohřev teplé vody. Princip tepelného čerpadla vychází z druhého termodynamického zákona, který říká, že v uzavřeném systému se teplo přenáší vždy z teplejšího prostředí do chladnějšího. [2] Pro správnou funkci tepelného čerpadla je tedy nutné dodávat do systému určité množství další energie, nejčastěji elektrické. Obecně se udává, že dvě třetiny energie pochází z nízkoteplotních zdrojů (podrobně se jimi zabývá kap. 3) a zbývající třetinu tvoří vlastní spotřeba elektrické energie pro pohon. [3] (Zde je důležité uvědomit si, že vzhledem k nezanedbatelnému množství spotřebovávané elektrické energie, která je v ČR vyráběna z 94 % [3] z neobnovitelných zdrojů, jsou TČ ekologická jen částečně.)

Tepelná čerpadla se dělí podle druhu ochlazované/ohřívání látky. Teplonosné médium, které čerpá teplo z okolního prostoru, se uvádí před lomítkem a může jím být okolní nebo odpadní vzduch, spodní voda či nemrzoucí směs. Proudí ve venkovní části, v tzv. primárním okruhu. Za lomítkem je udáváno odváděné tepelné médium, jímž bývá ve většině případů topná nebo užitková voda, případně vzduch pro vzdušné vytápění. Tvoří vnitřní část TČ a zajišťuje předávání tepla v sekundárním okruhu – topném systému. [2, 4]

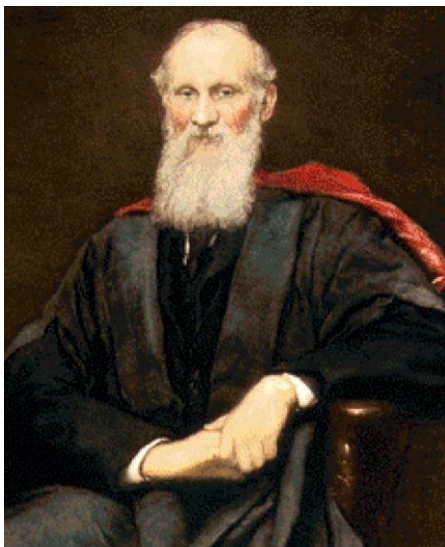
Tepelné čerpadlo pracuje stejně jako chladnička na principu uzavřeného chladicího okruhu, v němž cirkuluje chladivo. Nejrozšířenějším typem tepelných čerpadel jsou taková, v nichž oběh chladiva zajišťuje kompresor. Tato diplomová práce se zabývá výhradně kompresorovými TČ, další typy jsou zmíněny pouze okrajově v kap. 2.3.

2.1 Historický vývoj tepelných čerpadel

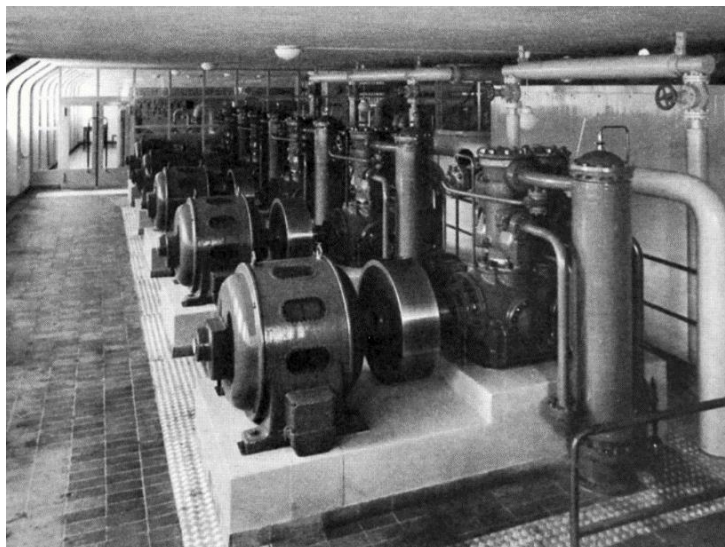
První, kdo blíže popsal vztah mezi teplem a prací, byl francouzský vědec Nicolas Léonard Sadi Carnot. Ve svém díle *Úvahy o hybné síle ohně a strojích vyvolávajících tuto sílu* z roku 1824 popsal známý Carnotův cyklus, na jehož základě formuloval roku 1852 britský profesor fyziky, William Thomson, později lord Kelvin (obr. 2.1), ve svém druhém zákonu termodynamiky základní princip tepelného čerpadla. K jeho realizaci však vedla dlouhá cesta. Původní snahy směřovaly spíše ke kompresorovému chladicímu zařízení, které bylo poprvé sestaveno roku 1834 Američanem Jacobem Perkinsem. První zařízení na absorpčním principu pracující s amoniakem vzniklo r. 1851 zásluhou Francouze Ferdinanda Carré. Až roku 1927 byl však udělen první patent na tepelné čerpadlo jako takové, který získal anglický vynálezce T. G. N. Haldane za svou experimentální verzi zařízení pro vnitřní vytápění a ohřev vody, jež instaloval ve svém domě ve Skotsku. [5, 6, 7]

Evropským průkopníkem v konstrukci tepelných čerpadel bylo Švýcarsko, které během světových válek trpělo nedostatkem fosilních paliv a většinu energie získávalo pouze z vodních elektráren. Mezi lety 1938 a 1945 zde bylo vyrobeno a instalováno 35 tepelných čerpadel využívajících převážně teplo z řek, jezer nebo odpadní teplo např. ze stadionů či pivovarů. Hlavními konstruktéry byly Sulzer ve Wintherturu a Escher Wyss v Curychu, jenž se proslavil systémem vytápění curyšské radnice či plaveckého bazénu (obr. 2.2). [6]

Většímu rozšíření tepelných čerpadel v praxi dlouhou dobu bránila jejich vysoká cena vzhledem k nízkým cenám energií. Zlom nastal až v 70. letech minulého století v souvislosti s tehdejší ropnou krizí a zdražením fosilních paliv, důsledkem čehož byla tendence hledat jiné způsoby získávání tepla a TČ se tak začala široce využívat. [5, 8]

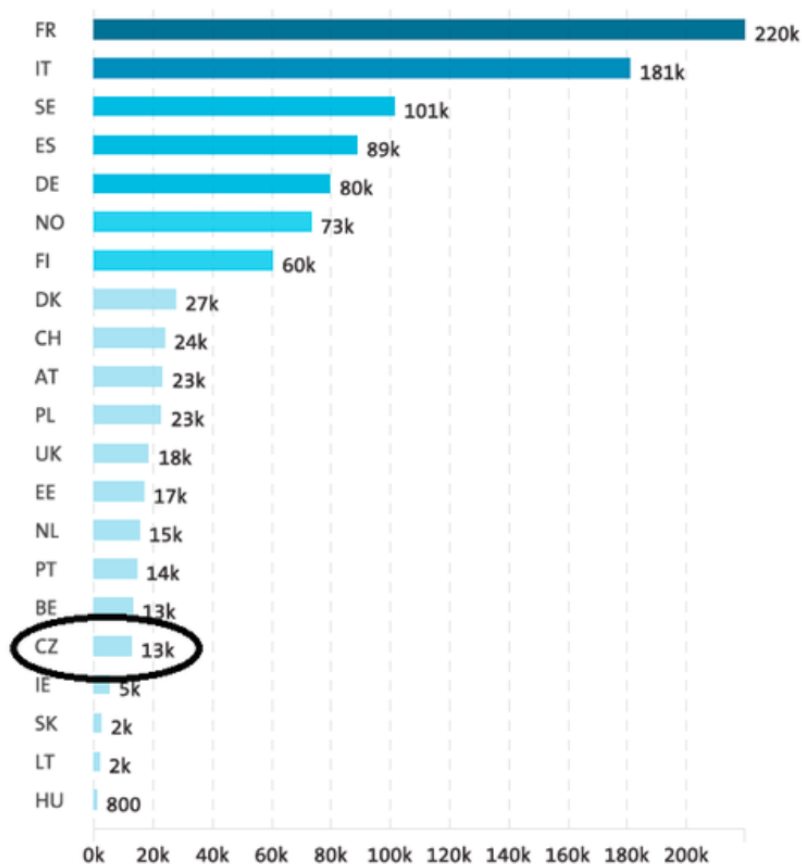


Obr. 2.1 William Thomson (lord Kelvin) [6]

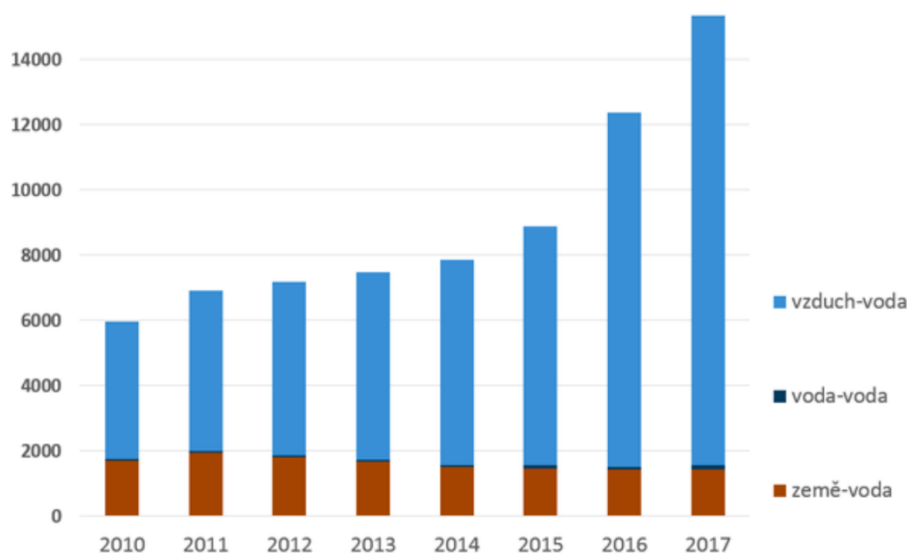


Obr. 2.2 Pístové kompresory TČ instalovaných r. 1941 pro vytápění curyšského plaveckého bazénu [6]

V současné době lze TČ považovat za běžná zařízení používaná pro vytápění a ohřev vody. Podle Evropské asociace tepelných čerpadel roste za poslední 4 roky trh s TČ každoročně o 15 % a na konci roku 2017 již bylo dosaženo 10 milionů nainstalovaných zařízení. Důvod jejich značného rozšíření lze spatřovat především v rostoucím zájmu o ochranu životního prostředí a snižování energetické náročnosti budov. Česká republika mezi dalšími evropskými státy v počtu instalací zatím značně pokulhává (viz obr. 2.3), avšak v posledních letech je i zde patrný značný nárůst prodeje, což je zřejmé z grafu obr. 2.4. V současnosti je v ČR v provozu přes 80 000 tepelných čerpadel, z nichž asi 88 % funguje na principu vzduch/voda. [9]



Obr. 2.3 TČ instalovaná v roce 2016 v evropských státech [9]

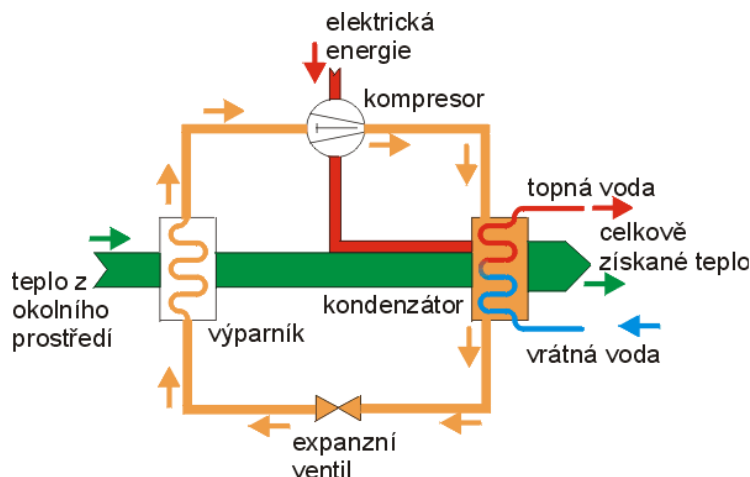


Obr. 2.4 Vývoj počtu instalací TČ v ČR [9]

2.2 Princip kompresorového tepelného čerpadla

Tepelné čerpadlo pracuje na stejném principu jako chladnička, pouze využívá opačnou stranu cyklu. V chladícím oběhu je uplatněn fakt, že teplota varu/kondenzace různých látek (chladiv) závisí na tlaku. [10] Skládá se ze čtyř základních částí: výparníku, kompresoru, kondenzátoru a expanzního (škrtkového) ventilu, viz obr. 2.5.

Nízkopotenciální teplo je zvenku přiváděno prostřednictvím teponosného media do výparníku – primárního výměníku tepla, do jehož druhé části se vstříkne kapalné chladivo z expanzního ventilu. Chladivo se ve výparníku v důsledku nižšího tlaku než je před expanzním ventilem odpařuje, čímž ochlazuje výparník na nižší teplotu než je teplota nízkoteplotního zdroje. Teplo dodávané okolním prostředím je tedy spotřebováváno na změnu skupenství chladiva z kapalného na plynné. Chladivo ve formě studeného plynu je následně nasáváno kompresorem, kde je plyn stlačen na vysoký tlak, čímž se silně zahřeje. Kompresor tak dodá chladivu při stlačení další energii, tentokrát ale ne formou tepla nýbrž formou práce vnějšího zdroje (nejčastěji elektromotoru, případně např. plynového spalovacího motoru). Stlačený plyn je poté veden do kondenzátoru – sekundárního výměníku tepla, kterým proudí obvykle topná voda o nižší teplotě. Chladivo je v kondenzátoru ochlazen tak, že zkondenzuje a změnou skupenství předá teplo ohřívání látky. Kapalina je opět vedena do expanzního ventilu, kde se sníží tlak chladiva na původní hodnotu a cyklus se opakuje. [5, 10]

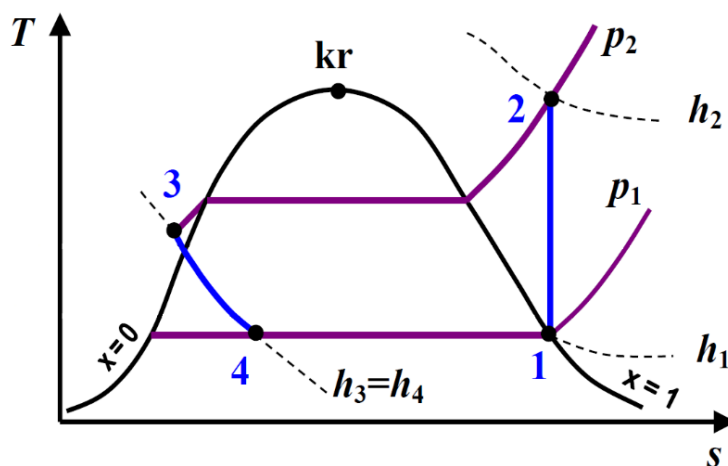


Obr. 2.5 Princip kompresorového tepelného čerpadla [11]

2.2.1 Pracovní cyklus tepelného čerpadla

Skutečné procesy v oběhu tepelného čerpadla nejlépe vyjadřuje obrácený Rankin-Clausiiův cyklus. Chladicí oběh transformuje dodávanou práci na teplo, resp. spotřebovává práci za účelem změny stavových veličin pracovní látky. Teoretický pracovní cyklus tepelného čerpadla je znázorněn v T - s (teplota-entropie) diagramu na obr. 2.6. [12, 13, 14]

Páry chladiva jsou v kompresoru izotropicky stlačovány ze stavu syté páry 1 na stav přehřáté páry o vyšší teplotě 2. V kondenzátoru se pracovní plyn ochladí na mez sytosti plynu a následně zkondenzuje až do kapalného stavu 3, přičemž je chladivu izobaricky odváděno teplo. V expanzním ventilu dochází k izoentalpickému škrcení chladiva na nižší tlak a teplotu, čímž se pracovní látka dostane do stavu mokré páry 4. Ve výparníku probíhá vypařování pracovní tekutiny do stavu syté páry 1 v důsledku přenosu tepla z ochlazované látky. [12, 13]



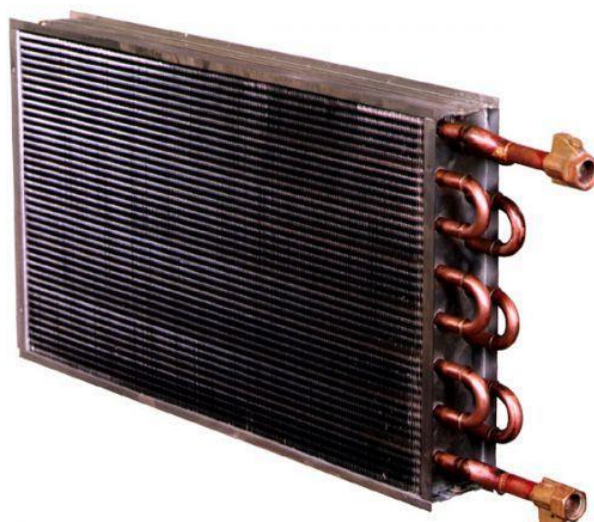
Obr. 2.6 Chladicí oběh v T - s diagramu (upraveno) [13]

2.2.2 Výparník

Výparník je jedním ze dvou tepelných výměníků v chladicím oběhu tepelného čerpadla. Odebírá teplo nízkoteplotnímu zdroji energie a předává ho pracovní látce. Dochází zde k první změně skupenství v parním oběhu, jelikož chladivo se zde při nízkém tlaku a teplotě v důsledku dodání tepla vypařuje. Chladivo je schopno získávat teplo z teplonosného média i při velmi nízkých teplotách; ochlazovaná látka však musí mít vždy vyšší teplotu než vypařující se pracovní látka, aby byl zajištěn potřebný tepelný tok. [14, 15]

Pro kapalná média, tzn. u systémů země (nemrznoucí směs)/voda nebo voda/voda, jsou jako výparníky používány pájené deskové výměníky tepla (více o nich v kap. 2.2.4), pro systémy vzduch/voda nejčastěji lamelové výměníky. [15]

Lamelové výměníky jsou trubkové výměníky s žebrovaním (obr. 2.7). Skládají se z několika řad měděných či hliníkových trubek opatřených hliníkovými žebry (lamelami); v současnosti jsou instalovány též celonerezové konstrukce. Žebrovaním se zvětšuje teplosměnná plocha, čímž se zvyšuje přenos tepla trubkou. Výhodou těchto výměníků je jejich tvarová přizpůsobivost a poměrná jednoduchost. Na vstupu do lamelového výparníku je umístěn distributor (rozdělovač) vstřikovaného chladiva, který zajišťuje rovnoměrné rozdělení chladiva z expanzního ventilu do jednotlivých sekcí výměníku, jež jsou následně obvykle spojeny do větší trubky. Součástí vzduchových výměníků tepla je též ventilátor, který zajišťuje dostatečný průtok vzduchu výparníkem. [5, 16, 17, 18]



Obr. 2.7 Lamelový výměník tepla [19]

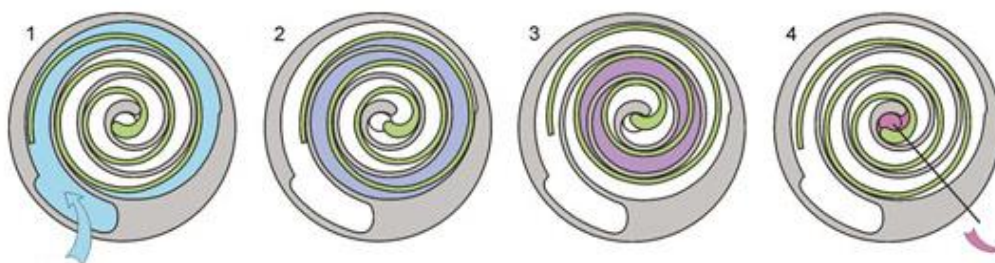
2.2.3 Kompresor

Kompresor je základním prvkem tepelného čerpadla zajišťující cirkulaci chladiva v oběhu. Jeho hlavní funkcí je stlačování par chladiva z vypařovacího tlaku na tlak kondenzační za účelem zvýšení jejich teploty. Kompresoru musí být dodávána práce vnějším pohonem, kterým bývá ve většině případů elektromotor. [14, 15, 20]

Kompresory v tepelných čerpadlech jsou obvykle hermeticky uzavřené, což znamená, že pohonný elektromotor a kompresor jsou společně uloženy v jedné tlakové ocelové nádobě. Výhodou tohoto provedení je naprostá těsnost, takže nemůže docházet k únikům chladiva do atmosféry. Existují však i kompresory v provedení polohermetickém či otevřeném. [5, 10, 15]

V aplikacích tepelných čerpadel pro rodinné domy a průmyslové objekty byly dříve hojně rozšířeny pístové kompresory, v současnosti jsou však nejčastěji používány dva typy rotačních kompresorů (scroll a dvojité rotační), jelikož dosahují lepších topných faktorů, jsou méně hlučné a mají lepší životnost. [10, 15, 20]

První kompresor typu scroll (spirálový) byl patentován už počátkem 20. století. Jeho princip je patrný z obrázku 2.8. Skládá se ze dvou spirál, jež jsou vloženy do sebe, přičemž jedna z nich je pevná a druhá excentricky krouží. Tím se mezi spirálami vytváří plynové kapsy, které se pohybují směrem ke středu spirály a zmenšují svůj objem, čímž dochází ke stlačování par chladiva a zvyšování jejich teploty. Páry jsou nasávány na obvodu spirály (obr. 1) a vystupují výfukovým otvorem ve středu (obr. 4). Spirály je nutné nepřetržitě mazat, aby nedocházelo k úniku chladiva. [5, 10, 20]



Obr. 2.8 Princip funkce kompresoru scroll (upraveno) [21]

Dvojitý rotační kompresor je tvořen dvěma pevnými válcovými komorami, z nichž v každé rotuje excentrická vačka. Ta společně s pohyblivou komorovou přepážkou, která odděluje sací a výtlakovou část, stlačuje páry chladiva. Hlavní výhodou tohoto provedení je velmi malé mechanické namáhání hřídele a ložisek rotoru (a tím i menší potřeba mazání), neboť vačky jsou na společné hřídeli uloženy v protilehlých polohách. [20]

Pro dosažení lepšího výkonu a vyššího topného faktoru je využíván systém EVI (z angl. *Enhanced Vapour Injection*). Princip je založen na ochlazování kompresního prostoru nástřikem chladných par chladiva zhruba uprostřed stlačovacího děje. Nasávané páry se v kompresoru smísí s částečně stlačenými parami, což způsobí pokles výsledné teploty na výtlaku. Páry vstřikované do kompresoru lze využít i k podchlazování chladiva za kondenzátorem, čímž se zvýší chladicí výkon soustavy. Hlavní výhodou tohoto systému lze spatřovat (při aplikaci v TČ vzduch/voda) v jeho schopnosti dosáhnout vyšší teploty topné vody i při nízké teplotě venkovního vzduchu. [20, 22, 23]

2.2.4 Kondenzátor

Kondenzátor je druhým výměníkem tepla v systému TČ. Probíhá zde skupenská změna pracovní látky z páry zpět na kapalinu, přičemž ke kondenzaci chladiva dochází při vysokém tlaku a teplotě. Změnou skupenství se uvolňuje teplo, jež je předáváno do topné soustavy. Přechod tepla je opět podmíněn rozdílem teplot – aby se uskutečnil, musí mít kondenzující pracovní látka vyšší teplotu než ohřívaná látka. [14, 15]

Jako kondenzátory v tepelných čerpadlech se používají buď deskové, nebo trubkové tepelné výměníky. Druhů trubkových výměníků existuje celá řada, lze jmenovat např. výměník článkový (tzv. trubka v trubce), svazkový výměník s přímými trubkami či šroubovicový výměník, v němž jsou trubky spirálovitě svinuty. Výhodou trubkových výměníků je nižší cena a jednoduchá údržba, jsou však podstatně rozměrnější než deskové výměníky stejného výkonu. [5, 15, 16, 18]

Ve většině tepelných čerpadel jsou jako kondenzátor využívány deskové výměníky tepla (obr. 2.9). Jedná se o speciálně prolisované desky z nerezové oceli, které jsou na sebe naskládány a spájeny mědí či niklem, nebo mohou být i svařeny. Mezi deskami se vylisováním vytvoří dvě skupiny kanálků, v nichž odděleně proudí média. Tyto výměníky jsou nerozebíratelné, takže tvoří kompaktní celek a snáší vysoké provozní tlaky. Jejich výhodou je velmi intenzivní přestup tepla a vysoká účinnost. Velká turbulence proudů pracovních látek, čistý protiproud a malá tloušťka stěny umožňují malé rozměry a hmotnosti těchto výměníků. Malé mezery mezi deskami mohou vést k zanášení a ucpávání nečistotami, jejichž případné čištění je obtížné, většinou se však projevuje samočistící efekt díky velmi velkým turbulentím v kanálech. [5, 16, 18, 24]



Obr. 2.9 Deskové výměníky tepla [25, 26]

2.2.5 Expanzní ventil

Expanzní ventil (EV), označovaný též jako škrťací či vstřikovací ventil, reguluje průtok chladiva z kondenzátoru do výparníku a tím zajišťuje optimální provoz výparníku. Dochází v něm ke škrcení pracovní látky z vyššího kondenzačního tlaku na nižší vypařovací tlak, čímž se zároveň snižuje i teplota chladiva. Expanzní ventil udržuje tlakový rozdíl mezi vysokotlakou a nízkotlakou částí chladicího okruhu. Zaručuje, že páry chladiva za výparníkem budou přehřáté a chladivo se tak před vstupem do kompresoru zcela vypaří. [10, 14, 15]

Expanzní ventily jsou řízeny buď termostaticky, nebo elektronicky. Termostatický expanzní ventil (TEV) je vybaven snímací buňkou, tzv. tykavkou, která při zvýšené teplotě za výparníkem vytváří tlakovou sílu působící na membránu a otevírá trysku ventilu. Z opačné strany působí na membránu tlak chladiva rostoucí s vypařovací teplotou, který společně s pružinou regulačního šroubu trysku zavírá. [5]

Elektronický expanzní ventil (EEV) řízený mikroprocesorem je elektromechanické zařízení ovládané servopohonem. Na výstupu z výparníku jsou umístěna čidla tlaku a teploty, jejichž měření jsou zpracovávána kontrolerem, který řídí otevírání a zavírání trysky ventilu. Na rozdíl od TEV může pracovat se všemi typy chladiv a v širokém rozsahu výkonů, a je také mnohem přesnější v regulaci průtoku chladiva. [27]



Obr. 2.10 Elektronický expanzní ventil (Carel) [28]

2.2.6 Chladiva

Chladivo je pracovní látka, která cirkuluje v chladivovém okruhu tepelného čerpadla. Ve výparníku přijímá energetický tok z okolí při nízké teplotě a tlaku, přičemž mění své skupenství z kapalného na plynné. Tuto získanou energii následně v kondenzátoru při vyšší teplotě a tlaku předává do topného systému, což probíhá za současné změny skupenství chladiva zpět na kapalné. [14, 29]

V obězích kompresorových TČ se používají jak čisté jednosložkové látky, tak azeotropní a zeotropní směsi chladiv. Zeotropní směsi obsahují na rozdíl od azeotropních směsí látky s různým bodem varu při stejném tlaku. Jednotlivé složky zeotropních směsí mají tedy rozdílné teploty vypařování a kondenzace (tzv. teplotní skluz), což se projevuje proměnným složením během fázové přeměny páry na kapalinu a opačně. [5, 14]

Používání některých druhů chladiv je legislativně regulováno z důvodu jejich negativního vlivu na životní prostředí (poškozují stratosférickou ozonovou vrstvu, způsobují skleníkový efekt, čímž přispívají ke globálnímu oteplování, a znečišťují ovzduší). Vliv chladiv na poškozování ozonové vrstvy popisuje koeficient ODP (Ozone Depletion Potential). Za referenční chladivo byl stanoven freon R11, jehož ODP = 1. V současnosti jsou v TČ běžně používána chladiva s nulovým potenciálem poškozování ozonové vrstvy. Ukazatelem vlivu

chladiwa na globální oteplování je koeficient GWP (Global Warming Potential). Hodnota GWP je dána nejen schopností plynu zachycovat teplo v atmosféře, ale také počtem let, za něž se plyn v atmosféře rozpadne. GWP udává, kolikrát větší dopad má daný plyn na skleníkový efekt než referenční plyn CO₂. Používání chladiv s vysokým GWP je v dnešní době omezováno. [5, 14, 30, 31]

Nejrozšířenějšími chladivy druhé poloviny 20. století byly tzv. freony, chladiva na bázi chlorfluorovaných uhlovodíků. Tvrdé freony jsou plně halogenované uhlovodíky (CFC), jež mají všechny atomy vodíku v molekule nahrazeny chlorem nebo fluorem. Částečně halogenované uhlovodíky (HCFC) nazývané též měkké freony obsahují i atomy vodíku. Freony mají vysokou hodnotu ODP, jelikož obsahují chlor, který silně poškozuje ozonovou vrstvu atmosféry. V současné době se většinou používají fluorované uhlovodíky a jejich směsi (HFC), viz tabulka 2.1. Tato chladiva neobsahují chlor a jsou tedy neškodná pro ozonovou vrstvu. Mají však také negativní vliv na životní prostředí, jelikož výrazně přispívají ke skleníkovému jevu a tím ke globálnímu oteplování. Většina chladiv na bázi HFC má hodnotu GWP v řádu tisíců jednotek. [4, 5, 29, 30, 31]

Tab. 2.1 Nejčastěji používaná chladiva v tepelných čerpadlech [14, 31]

| Chladivo | Chemický vzorec nebo hmotnostní složení (%) | Skupina | ODP | GWP |
|----------|----------------------------------------------|---------|-----|------|
| R410A | R32/R125 (50/50) | HFC | 0 | 2088 |
| R407C | R32/R125/R134a (23/25/52) | HFC | 0 | 1774 |
| R134a | C ₂ H ₂ F ₄ | HFC | 0 | 1430 |
| R32 | CH ₂ F ₂ | HFC | 0 | 675 |

Novými chladivy na bázi alkenů (dříve nazývaných olefiny), která představují případnou náhradu chladiv typu HFC, jsou tzv. hydrofluoro-olefiny (HFO). Tyto nenasyčené uhlovodíky jsou stejně jako HFC složeny z atomů vodíku, fluoru a uhlíku, mezi atomy uhlíku však mají dvojnou vazbu. Chladiva skupiny HFO mají nulovou hodnotu ODP a některá z nich i velmi nízké GWP. Nejznámějším z nich je R1234yf, jež má GWP = 4. [31]

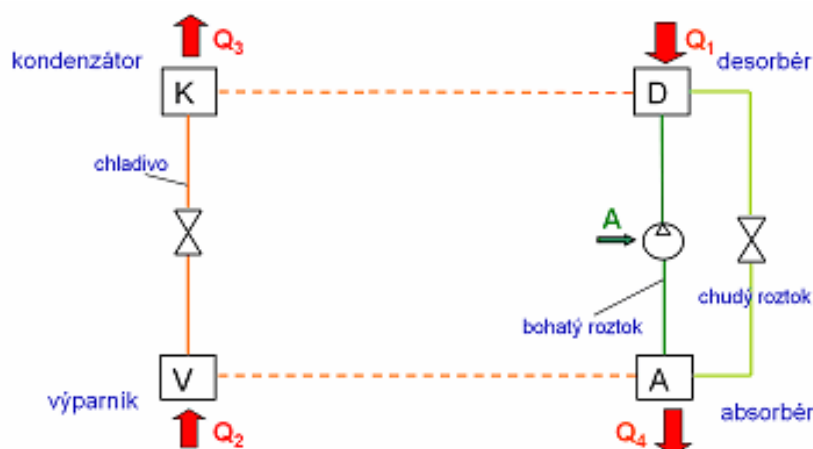
Poslední skupinou jsou chladiva přírodní, která se vyrábí na bázi sloučenin, jež se běžně vyskytují v přírodě, např. čpavek, oxid uhličitý, propan, isobutan či etan. Nemají škodlivý vliv na ozonovou vrstvu, ke globálnímu oteplování přispívají jen minimálně a jsou tedy nejšetrnější k životnímu prostředí. Přírodní chladiva (kromě oxidu uhličitého) jsou však hořlavá nebo jedovatá, což je jejich velkou nevýhodou. [5, 31]

2.3 Další typy tepelných čerpadel

V současnosti jsou nejrozšířenější kompresorová tepelná čerpadla, a to zejména díky prudkému nástupu spirálových kompresorů scroll, které mají lepší účinnost než klasické pístové kompresory. Můžeme se však setkat i s TČ, u nichž oběh chladiva nezajišťuje kompresor. Jedná se především o různé typy sorpčních čerpadel, kde v oběhu kromě chladiva koluje ještě další látka. Ta chladivo vstřebává a uvolňuje za přestupu tepla. Existují i hybridní tepelná čerpadla, jež kombinují sorpční a kompresorový oběh. [10]

Princip absorpčního oběhu (AO) je patrný z obr. 2.11. Přívod technické práce elektricky poháněným kompresorem je nahrazen chemickým procesem v termokompresoru, pro jehož pohon se využívá teplo. Chladivo v podobě páry je z výparníku nasáváno do absorbéru, ve kterém je nízký tlak. Páry chladiva jsou zde absorbovány do kapalné absorpční látky, přičemž se uvolní určité množství tepla. Pomocí čerpadla je poté vzniklá směs (bohatý roztok) dopravena do vysokotlaké části oběhu – desorbéru (generátoru), kde se v důsledku zvýšení teploty směsi oddělí páry chladiva od absorbentu. Absorpční kapalina zbavená chladiva (chudý roztok) se z desorbéru vrací oddělenou větví přes škrťací ventil zpět do absorbéru. Uvolněné

páry chladiva, stejně jako u kompresorového TČ, pokračují do kondenzátoru, kde při kontaktu s ochlazovaným povrchem kondenzují. Chladivo v kapalném skupenství následně prochází přes expanzní ventil do výparníku, v němž se vlivem snížení tlaku kapalina vypařuje. Cyklus se uzavírá absorpcí par v absorbéru. [2, 4, 32, 33]



Obr. 2.11 Základní schéma absorpčního oběhu [33]

Absorpční oběhy jsou buď přímo, nebo nepřímo vytápěné. Je-li hnací tepelná energie dodávána desorbéru za pomoci integrovaných hořáků, jedná se o přímo vytápěný absorpční oběh. Pokud je teplo předáváno přes teplosměnné plochy ohříváné horkou vodou či parou, jde o AO vytápěný nepřímo. Volba vhodné dvojice pracovních látek závisí především na dobré rozpustnosti chladiva v absorbentu a na jejich schopnosti pracovat v oblasti použitelných tlaků a teplot. V současnosti nejvíce využívané pracovní dvojice jsou amoniak jako chladivo a voda jako absorbent, a dále voda jako chladivo a jako absorbent NaOH, nebo roztok bromidu či chloridu lithného. [33]

Hlavní výhodou absorpčních TČ je podstatně menší spotřeba elektrické energie, která je přibližně pětkrát nižší než u kompresorových TČ. Další předností je vzhledem k absenci pohyblivých součástí naprosto tichý a velmi spolehlivý chod. Oproti kompresorovým jednotkám mají však větší rozměry a hmotnost a jsou také finančně náročnější. Absorpční zařízení jsou vhodná pro větší výkony a využívají se především pro chlazení a klimatizační jednotky. [4, 10, 33]

Adsorpční tepelná čerpadla jsou zatím velmi málo známá, a proto zde jejich bližší popis není uveden. K pohonu využívají rovněž tepelnou energii, avšak páry chladiva jsou v tomto případě pohlcovány pevnou látkou, jakou je např. aktivní uhlí, silikagel či zeolit. [4]

2.4 Hodnocení efektivity tepelných čerpadel

K porovnání tepelných čerpadel z hlediska energetické kvality slouží dva základní parametry. Prvním z nich je jmenovitý topný faktor (COP), který se stanovuje pro daný standardní provozní bod odpovídající nejčastějšímu provoznímu stavu. Druhým parametrem je sezónní topný faktor ($SCOP$), jenž popisuje průměrnou energetickou náročnost TČ za celou topnou sezónu. Je třeba uvědomit si, že oba parametry jsou určovány laboratorně pro definované standardizované podmínky a v reálném nasazení TČ nemusí jejich hodnoty odpovídat hodnotám udávaným výrobcem. [34]

2.4.1 Topný faktor *COP*

Topný faktor tepelného čerpadla, označovaný též jako *COP* (z anglického pojmu *Coefficient of Performance*), je definován jako poměr topného výkonu k celkovému elektrickému příkonu jednotky za ustálených provozních podmínek (viz rovnice 2.1). Jedná se o bezrozměrnou veličinu nabývající hodnot v rozmezí od 1,5 do 7 v závislosti na podmínkách, v nichž tepelné čerpadlo pracuje. Čím je hodnota *COP* větší, tím efektivnější je provoz tepelného čerpadla. [2, 34, 35]

$$COP = \frac{Q_T}{P} = \frac{Q_T}{Q_T - Q_{CH}} [-] \quad (2.1)$$

kde:

Q_T – topný výkon TČ [kW]

Q_{CH} – chladicí výkon nízkoteplotního zdroje [kW]

P – elektrický příkon TČ [kW]

Z rovnice 2.1 vyplývá energetická bilance tepelného čerpadla: tepelný výkon Q_T je roven součtu chladicího výkonu nízkoteplotního zdroje Q_{CH} a elektrického příkonu P . Do celkového elektrického příkonu se započítává příkon kompresorů, oběhových čerpadel, ventilátorů, ale též energie spotřebovaná na odtávání či provoz regulačních a zabezpečovacích prvků. [4, 34]

Pokud chceme srovnávat tepelná čerpadla, musíme kromě samotné hodnoty *COP* znát i podmínky, při kterých byl uvedený topný faktor stanoven – teploty na vstupu do výparníku a teploty na výstupu z kondenzátoru. Standardní podmínky pro laboratorní měření *COP* jsou dány normou ČSN EN 14511¹. Pro systém vzduch/voda je teplota vzduchu na vstupu do výparníku 7 °C a teplota otopné vody na výstupu z kondenzátoru 35 °C – označení A7/W35², pro systém země/voda je teplota nemrznoucí směsi 0 °C a teplota otopné vody 35 °C – B0/W35 a pro systém voda/voda je teplota vstupní vody 10 °C a teplota výstupní vody 35 °C – W10/W35. [34]

Efektivita tepelného čerpadla závisí na rozdílu teplotních hladin vnějšího a vnitřního prostředí, jelikož při menším rozdílu teplot spotřebovává TČ méně energie a naopak. Teplotu na vstupu do výparníku ovlivnit nelze, neboť je dána nízkopotenciálním zdrojem tepla, je však výhodné ochlazovat co nejteplejší látku. Teplota otopné vody pro nízkoteplotní vytápěcí systémy v domech se pohybuje v rozmezí 30 až 50 °C. Čím je teplota nižší, tím lepšího topného faktoru se dosáhne. Pro budovy využívající k vytápění tepelná čerpadla je tedy výhodnější podlahové či stěnové topení, které pro provoz nevyžaduje tak vysoké teploty topné vody jako běžné radiátory. [10, 35]

2.4.2 Sezónní topný faktor *SCOP*

Sezónní topný faktor tepelného čerpadla *SCOP* (z angl. *Seasonal Coefficient of Performance*) je poměr mezi teplem dodaným tepelným čerpadlem a spotřebou elektrické energie na provoz systému za celý rok:

$$SCOP = \frac{\text{roční spotřeba tepla}}{\text{roční spotřeba elektrické energie}} [-] \quad (2.2)$$

¹ ČSN EN 14511 – Klimatizátory vzduchu, jednotky pro chlazení kapalin a tepelná čerpadla s elektricky poháněnými kompresory pro ohřívání a chlazení prostoru, soubor norem pro zkoušení tepelných čerpadel, ÚNMZ 2014.

² Historicky se však stále používá kombinace A2/W35.

Výpočet *SCOP* se provádí dle postupu definovaného normou ČSN EN 14825³ pro standardizované provozní podmínky, kterými jsou návrhová tepelná ztráta budovy a nízkoteplotní (35 °C) nebo vysokoteplotní (55 °C) otopná soustava, a pro standardizované klimatické podmínky. Pro účely výpočtu *SCOP* jsou definovány tři klimatické oblasti, do nichž je Evropa rozdělena (viz obr. 2.12): [34, 36]

- chladnější – Helsinky (návrhová venkovní teplota: -22 °C, otopná sezóna: 6446 hodin)
- průměrná – Štrasburk (návrhová venkovní teplota: -10 °C, otopná sezóna: 4910 hodin)
- teplejší – Athény (návrhová venkovní teplota: +2 °C, otopná sezóna: 3590 hodin)



Obr. 2.12 Klimatické oblasti Evropy [37]

Hodnota *SCOP* je nejlepším měřítkem účinnosti tepelného čerpadla, neboť popisuje jeho reálnou provozní efektivitu v režimu vytápění mnohem lépe než hodnota jmenovitého topného faktoru *COP*. Sezónní topný faktor se používá pro klasifikaci daného zařízení do tříd energetické účinnosti pro účely energetického štítku a je tedy hlavním kritériem při srovnávání různých typů TČ od jednotlivých výrobců. [34, 36]

2.4.3 Značka kvality EHPA

Pro porovnávání a klasifikování tepelných čerpadel je nezbytné objektivní a kvalifikované hodnocení jejich kvality. Evropská asociace tepelných čerpadel (EHPA) vytvořila soubor požadavků na zajištění kvality výrobků a služeb a vypracovala metodiku měření a hodnocení, na jejímž základě je tepelným čerpadlům přidělována mezinárodní značka kvality *European Quality Label for Heat Pumps* označovaná též jako Q-label (obr. 2.13). U zařízení označených tímto štítkem je kromě kvality výrobku zajištěna též dostupnost náhradních dílů a celková údržba po instalaci. [38, 39, 40]

³ ČSN EN 14825 – Klimatizátory vzduchu, jednotky pro chlazení kapalin a tepelná čerpadla s elektricky poháněnými kompresory pro ohřívání a chlazení prostoru – Zkoušení a klasifikace za podmínek částečného zatížení a výpočet při sezónním nasazení. ÚNMZ 2014.



Obr. 2.13 Značka kvality [40]

Evropská asociace tepelných čerpadel v současnosti sdružuje 26 zemí, přičemž značka kvality je udělována ve dvanácti z nich včetně České republiky. Asociace pro využití tepelných čerpadel (AVTČ), jakožto garant přidělování značky v ČR, vytvořila národní komisi, která byla roku 2010 schválena EHPA. [38, 39, 40]

Minimální hodnoty *COP* stanovené EHPA pro udělení značky kvality Q-label jsou v tabulce 2.2.

Tab. 2.2 Minimální topné faktory tepelných čerpadel [34]

| Tepelné čerpadlo | Jmenovité podmínky | Požadavek |
|------------------|--------------------|-------------|
| vzduch/voda | A2/W35 | $COP > 3,1$ |
| země/voda | B0/W35 | $COP > 4,3$ |
| voda/voda | W10/W35 | $COP > 5,1$ |

3 NÍZKOTEPLTNÍ ZDROJE

Zdrojem tepla pro tepelná čerpadla je nízkopotenciální energie okolního prostředí. Tuto energii lze získávat buď z přírodních zdrojů tepla, nebo z druhotných zdrojů z technologických procesů. Na charakteru a parametrech těchto zdrojů tepelné energie závisí účelnost a hospodárnost celého zařízení, přičemž základními posuzovanými kritérii zdroje jsou především teplotní úroveň a druh látky včetně hmotnostního toku. [14]

Přírodními zdroji energie jsou venkovní vzduch, půda a povrchová či spodní voda (blíže o nich v následujících kapitolách). Obecně se jedná o využití sezónní akumulace tepelné energie ze solárního záření nebo geotermální energie. Teploty těchto zdrojů se vyznačují větší či menší fluktuací závislou na ročním období i denní době. [14, 41]

Druhotnými zdroji tepla jsou látky, které odchází z technologických procesů při vyšších teplotách, než je teplota okolí. Je-li jejich teplotní hladina tak nízká, že se nedají využít běžnými systémy zpětného získávání tepla (rekuperace), lze je použít jako zdroj tepla pro tepelná čerpadla. Teplo je možné získávat např. z odpadního a větracího vzduchu z průmyslových provozů či krytých koupališť, z odpadní, technologické či bazénové vody nebo ze sklepních a důlních prostor. Pro tyto zdroje je charakteristické, že jejich parametry nezávisí na počasí či roční době. [10, 14]

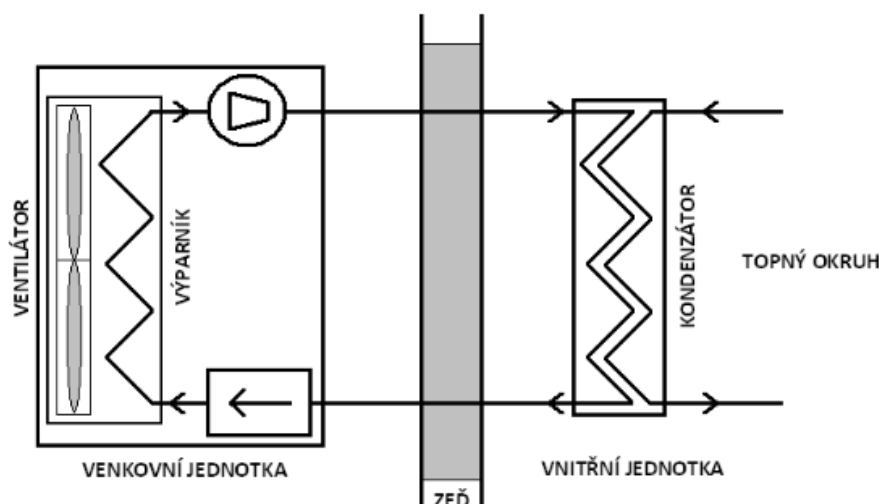
3.1 Vzduch

Vnější atmosférický vzduch ohříváný sluneční energií je prakticky nevyčerpatelným a nejdostupnějším zdrojem nízkopotenciálního tepla pro tepelná čerpadla. Lze ho považovat též za nejekologičtější, jelikož teplo odebírané vzduchu se vrací zpět ve formě tepelných ztrát objektu a přirozená tepelná rovnováha prostředí v podstatě není narušena. Další výhodou jsou též nižší pořizovací náklady a jednoduchá instalace, neboť v tomto případě nejsou potřeba vrty ani zemní kolektory. Vzduch proudí přímo výparníkem tepelného čerpadla (obr. 3.1), jehož součástí je ventilátor, který zajišťuje dostatečný průtok vzduchu a zlepšuje tak přestup tepla. Při volbě umístění TČ je třeba počítat s hlučností ventilátoru a zanedbatelný též není ani jeho elektrický příkon, který je nutné zahrnout do energetických výpočtů. [5, 10, 14]



Obr. 3.1 Vzduch jako zdroj energie [42]

Nejčastějším konstrukčním řešením je tepelné čerpadlo typu split (viz obr. 3.2). Jedná se o dvoudílné TČ, které je rozděleno na venkovní a vnitřní část propojenou tepelně izolovaným měděným potrubím s chladivem. Vně budovy se obvykle nachází výparník s ventilátorem, expanzní ventil a kompresor (ten někdy bývá i ve vnitřní jednotce), uvnitř objektu je potom kondenzátor a další zařízení. Nevýhodou tohoto provedení je složitější instalace, jelikož systém se plní chladivem až na místě stavby. [5, 10]

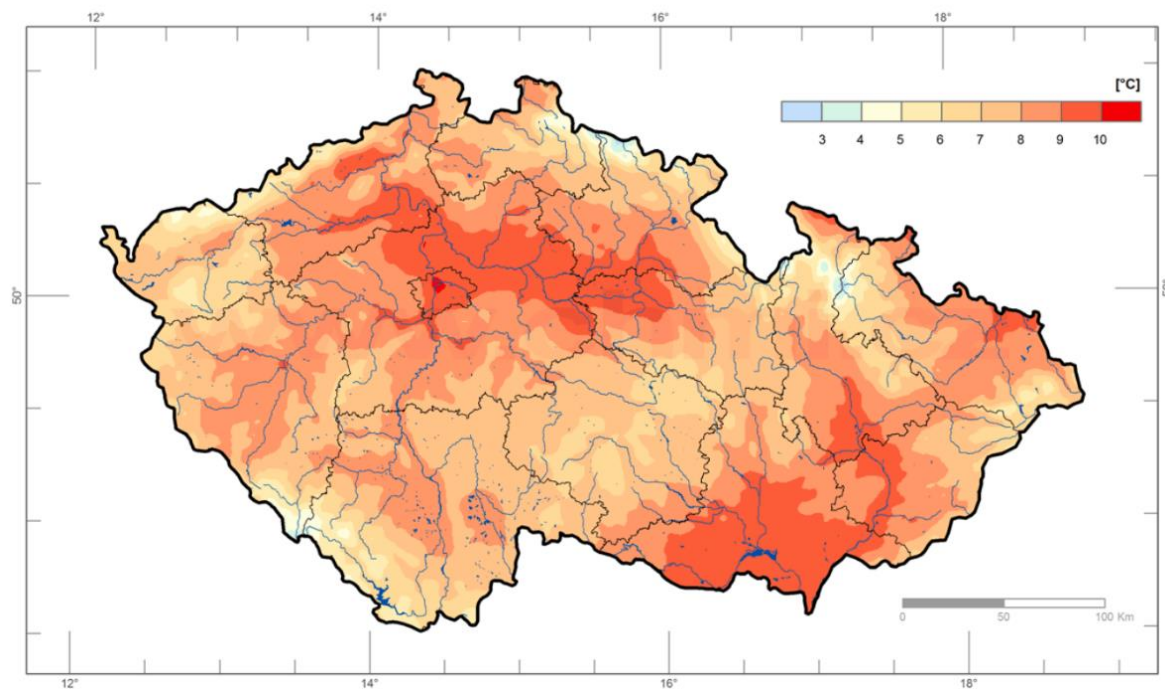


Obr. 3.2 Schéma děleného tepelného čerpadla vzduch/voda (split) [42]

Existují i jednodílná tzv. kompaktní tepelná čerpadla, která jsou dodávána výrobcem vcelku s hermeticky uzavřeným chladivovým okruhem a mohou být instalována buď vně, anebo uvnitř objektu. U kompaktních TČ, jež jsou celá včetně kondenzátoru umístěna mimo budovu, je potřeba při výpadku elektrické energie zajistit ochranu proti zamrznutí topné vody v potrubí vedoucím do domu. Kompaktní TČ, která nemají vnější jednotku, jsou i s výparníkem a ventilátorem zabudována uvnitř objektu. Mohou být instalována v přízemí, ve sklepe či na půdě, přičemž vzduch je přiváděn a odváděn otvory ve stěně. [2, 5, 10]

U tepelných čerpadel využívajících jako zdroj tepla venkovní vzduch je při teplotách kolem $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ nutné počítat se zamrznutím vodní páry na povrchu studených ploch výparníku. Tato vzniklá námraza závisící především na vlhkosti atmosférického vzduchu má za následek zhoršený přestup tepla ve výměníku a je potřeba ji odstraňovat. Energeticky nejméně výhodnou metodou odtávání námrazy je tzv. reverzní chod, kdy se zamění funkce výměníků tak, že výparník je ohříván pomocí tepla odebíraného z interiéru. Dalším, poměrně výjimečně aplikovaným způsobem je použití elektrického topného tělesa, které sice neovlivňuje vnitřní provoz TČ, ale je nákladnější z hlediska spotřeby elektrické energie. Nejnovativnější je využívání systému dvou výparníků, jež se při provozu střídají. Ačkoli je tento způsob investičně náročnější, zajišťuje stálý topný výkon, celkové zvýšení topného faktoru a snížení provozních nákladů (ve srovnání s reverzací chodu) [43]. Při odmrazování výparníku je důležitý též vhodně vyřešený odtok zkondenzované vody. [2, 5, 10, 14]

Teplota vnějšího vzduchu výrazně ovlivňuje výkon a topný faktor tepelného čerpadla. (Průměrné teploty vzduchu v ČR ukazuje obr. 3.3.) Při nízkých venkovních teplotách, kdy jsou kladeny nejvyšší nároky na vytápění vzhledem k velkým tepelným ztrátám objektu, pracuje TČ s nejnižším topným výkonem a *COP*. Výrobci uvádí, že vzduchová tepelná čerpadla mohou fungovat až do teplot kolem $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, ale ve skutečnosti jsou schopna efektivně pracovat jen do $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5]. Pokud venkovní teplota klesne na nižší hodnotu, než je TČ schopno zpracovat, je nutné do otopné soustavy připojit ještě další tzv. bivalentní zdroj tepla, např. elektrokotel. (Bivalentnímu provozu je věnována samostatná kap. 4.2.2.) Bivalentní zdroj může při poklesu teploty vzduchu buď pouze přehřívat topnou vodu tekoucí z výstupu TČ (paralelní provoz), anebo plně nahradit funkci TČ a vytápění zcela přebrat (alternativní provoz). Tepelná čerpadla jsou jen zřídka dimenzována na plný výkon a provozována jako monovalentní (více v kap. 4.2.1), většinou jsou navržena jen na 60 až 70 % [5] tepelných ztrát budovy při nejnižších teplotách venkovního vzduchu, přičemž další potřebu energie pokrývá doplňkový zdroj tepla. [5, 10, 14]



Obr. 3.3 Průměrná roční teplota vzduchu za období 1981–2010 (ČHMÚ) [44]

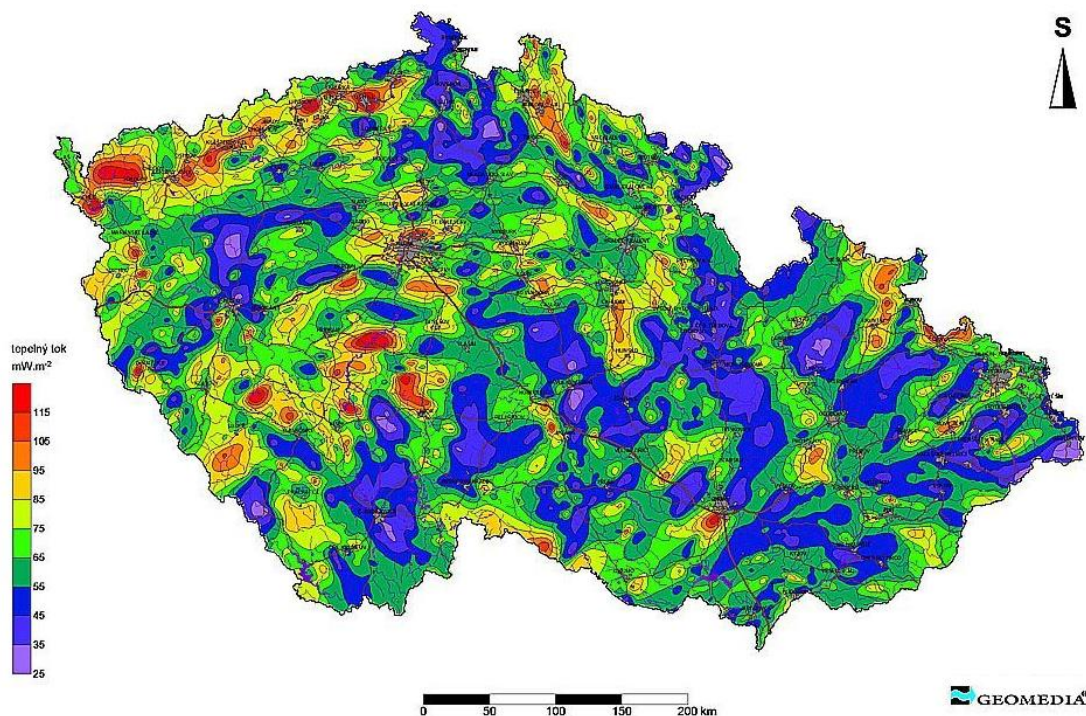
Jestliže je budova vybavena nuceným větráním, je výhodnější využívat jako zdroj tepla pro TČ odpadní vzduch z objektu, jelikož na ohřev větracího vzduchu je potřeba třetina až polovina celkové spotřeby tepla na vytápění. Výhodou oproti venkovnímu vzduchu jsou stále pracovní podmínky a vysoký topný faktor, neboť vnitřní vzduch má relativně vysokou konstantní teplotu pohybující se okolo 18–24 °C. Samotný větrací vzduch je však jako jediný zdroj tepla pro TČ nedostačující, protože je ho k dispozici pouze omezené množství. Pro vytápění domu je tedy třeba další zdroj nízkopotenciálního tepla, nebo je nutné budovu trvale dotápět přídatným zdrojem. [5, 14, 15]

Výhody a nevýhody použití venkovního vzduchu: [8, 15]

- + nízké pořizovací náklady
- + rychlá a jednoduchá instalace – lze použít prakticky všude
- + nejsou potřeba složité terénní a montážní práce
- zimní provoz – horší topný faktor – potřeba přídatný zdroj tepla
- velký rozdíl výkonu v závislosti na ročním období
- konstrukčně složitější zařízení – potřeba odtávání námrazy na výparníku
- nižší životnost kompresoru (kvůli práci s velmi nízkými teplotami)
- hluk z venkovního ventilátoru

3.2 Půda

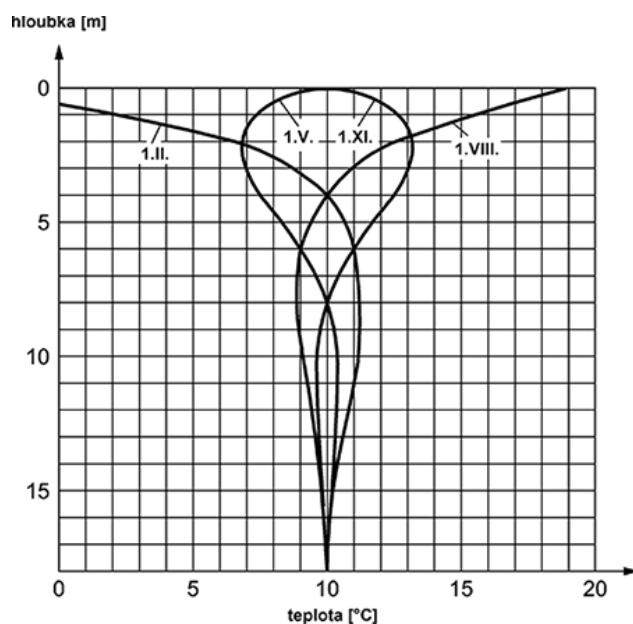
Zemská kůra je dalším významným zdrojem nízkopotenciální energie prostředí, kterou lze využívat prostřednictvím tepelných čerpadel. Jedná se o tzv. smíšený zdroj, jelikož 70 až 95 % tepelné energie dodávají půdě geotermální toky z hlubin Země, zbytek potom sluneční záření dopadající na zemský povrch. [14]



Obr. 3.4 Tepelný tok v České republice [45]

Půda je výhodným zdrojem tepla především pro svou teplotní úroveň, mírné výkyvy teplot, všeobecnou dostupnost a neomezenou tepelnou kapacitu. Realizace výměníků tepla pod zemským povrchem je náročná po technické i finanční stránce a pro návrh zařízení je důležité znát vlastnosti půdy a roční průběh teplot v jednotlivých hloubkách zemské kůry. Tepelný tok a s ním související vhodnost využití zemského tepla v ČR jsou patrné z obr. 3.4. Obecně se udává, že v hloubce zhruba 15 metrů pod povrchem je celoročně konstantní teplota rovnající se střední průměrné teplotě vzduchu v dané oblasti, viz obr. 3.5. [2, 14]

V praxi jsou aplikovány dva způsoby technického řešení odběru tepla zemské kůry, vždy se však jedná o použití uzavřeného primárního okruhu naplněného nemrznoucí směsí. Výměník tepla může být uložen buď horizontálně pod povrchem země, nebo ve vertikálním vrtu. [2, 5, 14]



Obr. 3.5 Rozložení teploty zemního masivu během roku v závislosti na hloubce [46]

3.2.1 Horizontální kolektory

Teplota půdy v hloubce 0,8 až 1 m pod povrchem neklesá ani v zimních měsících pod bod mrazu a v hloubkách kolem 1,5 až 2 m kolísá teplota během roku jen v rozmezí 5 °C, jak je patrné i z obr. 3.5. Těchto faktů využívají tepelná čerpadla, která odebírají zemské teplo pomocí horizontálních tepelných výměníků. [14]

Horizontální kolektory, nazývané též zemní plošné kolektory, jsou tvořeny polyethylenovým (PE) potrubím uloženým ve formě trubkového hada v nezamrznuté hloubce 1,2 až 2 m pod povrchem země (obr. 3.6). Trubky jsou naplněny nemrznoucí směsí, kterou je ve většině případů roztok polyethylenglykolu s vodou, a bývají umístěny ve vzdálenosti 0,6 až 1 m od sebe. Výkon zemního kolektoru se udává v rozmezí 20–25 W/m² plochy země [5]. Topný faktor se v průběhu roku mírně mění v závislosti na kolísání venkovní teploty. Nejhorší COP je na konci topné sezóny, jelikož půda už je vychlazená. Během léta se kolektor regeneruje přestupem tepla z okolních vrstev zeminy, slunečním zářením i teplem z venkovního vzduchu. Teplo z plošného kolektoru lze odebírat po celý rok. Pokud je však TČ využíváno nejen k vytápění, ale i k ohřevu TUV, je potřeba větší plocha kolektoru. Obecně platí, že plocha, ze které se teplo odebírá, by měla být asi 3 až 4krát větší než vytápěná plocha. [5, 10, 14]

Horizontální kolektory jsou vhodné zejména u novostaveb, které mají k dispozici dostatečný prostor, neboť potřebné rozsáhlé zemní práce se mohou spojit s ostatními výkopovými pracemi na staveništi. Nutné je také počítat s faktem, že půda v oblasti kolektorů silněji promrzá a v jejich blízkosti není vhodné pěstovat vyšší stromy ani stavět další objekty (bazén, skleník). [10, 47]



Obr. 3.6 Zemní plošné kolektory [42]

Výhody a nevýhody použití horizontálních kolektorů: [8, 15]

- + nižší investiční náklady a snazší technické práce v porovnání s vrtly
- + nízký příkon oběhového čerpadla v primárním okruhu
- + monovalentní provoz

- potřeba velká rozloha pozemku
- horší průměrný roční topný faktor ve srovnání s vrtly v důsledku kolísání teploty
- na pozemku nad kolektory nelze stavět ani vysazovat stromy

3.2.2 Vertikální kolektory (geotermální vrtů)

S rostoucí hloubkou pod povrchem země roste i teplota hornin s gradientem asi $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ na každých 30 m. Pro posouzení konkrétní lokality není však důležitá jen teplota, ale především tepelná vodivost hornin, jež závisí na složení podloží, množství podzemní vody a dalších faktorech. Průměrný tepelný tok na Zemi je $60 \pm 10\text{ mW/m}^2$, přičemž v ČR jsou i lokality s hustotou zemského tepla větší než 90 mW/m^2 , viz mapka na obr. 3.4. [5, 10]

K odběru tepla z podloží slouží obvykle dvě až tři hloubkové sondy (obr. 3.7) tvořené svazkem měděných trubek s plastovým povlakem, v nichž proudí nemrznoucí směs, nejčastěji vodní roztok monopropylenglykolu nebo monoetylglykolu. Sondy jsou uloženy ve vertikálních vrtech o průměru do 150 mm hlubokých 50 až 150 metrů, které by od sebe měly být rozmístěny ve vzdálenosti minimálně 5–10 metrů. Potřebná hloubka vrtu závisí na geologických podmínkách v dané oblasti, obecně se však udává, že na 1 kW výkonu TČ je potřeba 12 až 18 metrů hloubky [10]. Po vložení kolektorů je nutné vrt utěsnit vhodnou tepelně vodivou směsí (např. jílem), aby byl zajištěn dobrý přestup tepla. Provedení vrtu musí být schváleno příslušným stavebním a vodoprávním úřadem. [5, 10, 14]

Řešení tepelného čerpadla s hloubkovými sondami je vhodné realizovat v případě, kdy není k dispozici dostatečný prostor pro horizontální kolektory, musí se však počítat s vysokými náklady na zhotovení geotermálních vrtů. Tento systém se vyznačuje celoročně stálým a velmi dobrým tepelným faktorem, který běžně dosahuje hodnot 4–5 [10]. TČ je tedy možné provozovat po celý rok bez potřeby bivalentního zdroje. Vrt musí být dostatečně dimenzován, aby byla pokryta spotřeba odčerpávaného tepla, jinak by mohlo dojít k jeho zamrznutí. V letním období lze využít i jeho chladicího výkonu, čímž se vrt regeneruje, jelikož je zásobován teplem. [5, 10, 47]



Obr. 3.7 Vertikální kolektory [42]

Výhody a nevýhody použití vertikálních kolektorů: [8, 15]

- + celoročně stálé pracovní podmínky – monovalentní provoz
- + poměrně vysoký stabilní topný faktor
- + malé nároky na prostor
- + možnost letního chlazení

- nejvyšší investiční náklady z důvodu realizace vrtů
- složité technické práce
- souhlas stavebního a vodoprávního úřadu

3.3 Voda

Nízkopotenciální tepelná energie může být odebírána též z povrchové nebo podzemní vody, přičemž povrchová voda získává teplo ze slunečního záření, kdežto podzemní voda jak ze solární, tak i z geotermální energie. Teplota tekoucích a stojatých povrchových vod závisí na ročním období a obvykle bývá nižší než teplota atmosférického vzduchu v dané oblasti. Ve většině případů je proto využívána podzemní voda ze studní, jejíž teplota je ovlivňována teplotou zeminy a je prakticky konstantní po celý rok. Jestliže je primární okruh TČ otevřený, protéká voda přímo výparníkem. Pokud se jedná o uzavřený primární okruh, je teplo z vody odebíráno pomocí kolektorů s nemrznoucí směsí stejně jako v případě využívání tepla zemské kůry. [5, 14]

3.3.1 Podzemní voda

Podzemní (spodní) voda je nejlepším zdrojem tepla pro tepelná čerpadla, neboť její teplota je v hloubce větší než 10 m pod povrchem v průběhu roku stálá a má hodnotu 10 ± 1 °C [14] (v oblastech s geotermálními anomáliemi může být i výrazně vyšší). Výkon tepelného čerpadla je proto i v zimních měsících relativně neměnný a průměrný roční topný faktor dosahuje vysokých hodnot. Systémy využívající jako zdroj tepla podzemní vodu jsou výhodné hlavně v lokalitách s nízkými teplotami vzduchu a lze je provozovat jako monovalentní. [5, 10, 14]

Obvykle se budují dvě studny (viz obr. 3.8), přičemž voda je odebírána ze zdrojové (čerpací) studny, a poté, co předá teplo ve výparníku, je odvedena druhou, tzv. vsakovací (přepadovou) studnou zpět do země. Vrtané studny pro TČ bývají hluboké 10–30 metrů a měly by od sebe být vzdáleny 8–10 metrů tak, aby vsakovací studna byla situována ve směru proudění podzemní vody. Topný výkon TČ závisí na průtoku vody (0,02 až 0,03 kg/s na 1 kW [14]) a na jejím ochlazení, které se předpokládá v rozmezí 3–5 °C [5]. Teplota vody a její průtok v primárním okruhu musí být kontrolovány, aby nedošlo k zamrznutí vody ve výparníku a jeho případnému poškození. Důležité je nejen množství čerpané vody, ale také její čistota a chemické složení. Pokud by voda byla příliš mineralizovaná, docházelo by k zanášení výměníku. [5, 10, 14]

K provedení vrtu pro čerpání podzemní vody je nutné stavební povolení, dále pak odborný hydrogeologický průzkum a dlouhodobá čerpací zkouška, aby byla zaručena dostatečná vydatnost zdroje vody po celý rok. Při hodnocení přínosu TČ musí být brán v úvahu také příkon potřebný k čerpání vody ze studně. [5, 10, 14]



Obr. 3.8 Čerpací a vsakovací studna [42]

Výhody a nevýhody použití podzemní vody: [8, 15]

- + celoročně stálé pracovní podmínky
- + vysoký topný faktor nezávislý na teplotě vzduchu
- + monovalentní provoz (není potřeba přídavný zdroj tepla)
- + možnost využití stávající studny

- malý výskyt vhodných zdrojů s konstantní vydatností a teplotou vody
- požadavky na čistotu vody a její chemické složení
- administrativní nároky spojené s prováděním vrtů a čerpáním podzemní vody

3.3.2 Povrchová voda

Voda z řek, rybníků či vodních nádrží se jako zdroj tepla pro tepelná čerpadla využívá jen ve výjimečných případech. Teplota povrchových vod je v zimních měsících poměrně nízká, nezdávka klesá až k bodu mrazu, a u vodních toků se zmenšuje i průtok vody. Povrchová voda je obvykle znečištěná a je tedy nutné ji před použitím filtrovat, aby nedocházelo k zanášení teplosměnných ploch a potrubí. [10, 14]

Pokud se jedná o přímý systém, kdy je voda odebírána a přiváděna k výparníku, je vhodné v průběhu roku měnit místa odběru v závislosti na teplotě vody (v zimě ode dna, v létě v blízkosti hladiny). Častěji se využívá nepřímý systém (obr. 3.9), který teplo z vody odebírá pomocí výměníků tepla ponořených na dno toku či rybníka, v nichž je nemrznoucí teplotonosná látka. Použitím uzavřeného primárního okruhu odpadají problémy se zanášením výparníku a výhodou je také možnost provozování TČ i při teplotách vody blízkých 0 °C. [5, 14]

Pro odběr vody či uložení kolektoru je potřeba povolení správce toku nebo majitele rybníka, za odběr se též musí platit poplatky. Důležité je také počítat s příkonem potřebným na čerpání vody, nebo s příkonem oběhového čerpadla v uzavřeném primárním okruhu. [5, 10, 14]



Obr. 3.9 Kolektor ve stojaté vodě [42]

Výhody a nevýhody použití povrchové vody: [8]

- + nižší finanční náročnost ve srovnání s pořizováním vrtů

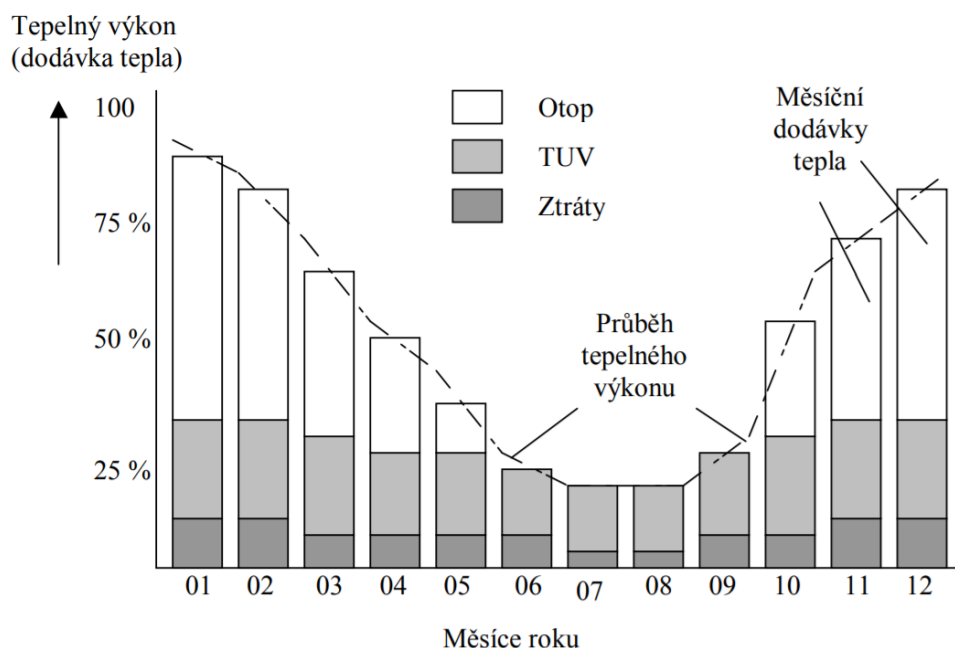
- málo lokalit s dostupným zdrojem povrchové vody
- nestabilní topný faktor závislý na počasí
- nutnost povolení od správce povodí či majitele rybníka
- přímý odběr: riziko zamrznutí, potřeba filtrace vody
- nepřímý odběr: nebezpečí poškození primárního výměníku

4 BUDOVA A TEPELNÉ ČERPADLO

Člověk je schopen trvale žít, pracovat a tvořit pouze v určitém rozsahu teplot okolního prostředí, které jsou dány fyziologií a termoregulací jeho těla. Spokojenost s tepelným stavem okolního prostředí, tzv. tepelná pohoda, vychází ze subjektivního hodnocení a pro její dosažení musí být zajištěna tepelná rovnováha mezi lidským tělem a okolím. Mezi faktory ovlivňující tepelnou bilanci organismu patří teplota vzduchu, střední radiační teplota, vlhkost vzduchu a rychlost proudění vzduchu. Kromě parametrů prostředí je třeba brát v úvahu i osobní faktory, a to sice hodnotu metabolismu (stupeň aktivity) a tepelný odpor oděvu. Tepelná pohoda tedy závisí na celé řadě parametrů a jejich kombinací, které musí být v optimálním poměru. Mezi jeden z nejdůležitějších parametrů patří bezesporu teplota okolního vzduchu, jež však v našich klimatických podmínkách v průběhu roku nedosahuje vždy optimálních hodnot. [41, 48]

V chladnější části roku (zhruba od října do dubna) jsou teploty vnějšího prostředí pod dolním limitem vhodným pro člověka a obytné prostory je tedy pro získání tepelné pohody nutné vytápět. Celoroční je potom potřeba tepelné energie pro ohřev TUV, protože ta není v takovém rozsahu závislá na venkovní teplotě. Nejvíce energie je v domácnostech České republiky spotřebováváno právě na výrobu tepla, jelikož dvě třetiny celkové spotřebované energie jsou použity k vytápění a necelá jedna pětina spotřeby jde na ohřev vody. [41, 49]

Obrázek 4.1 znázorňuje měsíční diagram průměrné potřeby tepla, přičemž rozlišuje množství energie potřebné pro vytápění, ohřev vody a krytí tepelných ztát.



Obr. 4.1 Typický měsíční diagram potřeb tepla s rozlišením účelů spotřeby [50]

4.1 Vlastnosti budovy a topné soustavy

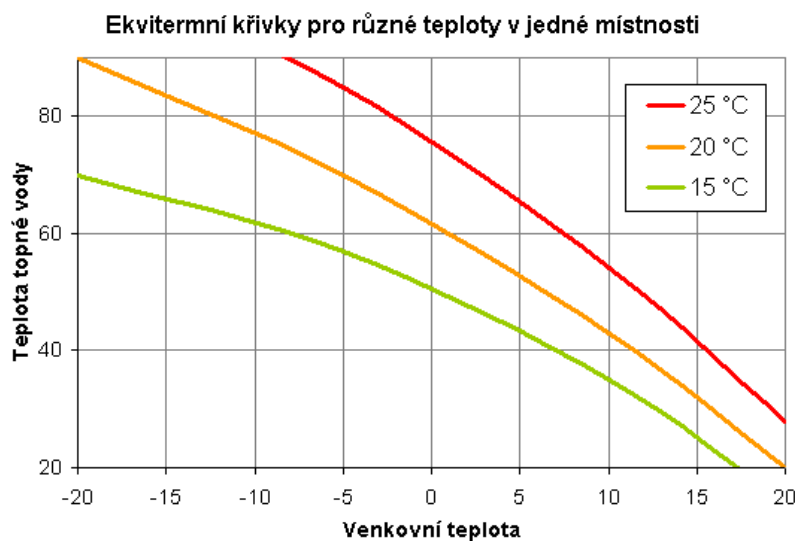
Tepelná soustava i zdroj tepla (tepelné čerpadlo) musí být dimenzovány tak, aby pokryly tepelné ztráty daného objektu, a v domě tak byla udržována požadovaná vnitřní teplota i při nízkých teplotách venkovního vzduchu. Tepelné ztráty jsou počítány podle stanovených kritérií pro venkovní výpočtovou teplotu, která se v České republice pohybuje v rozmezí -12 až -21 °C a pro délku topného období dané lokality. [10, 51]

Pro efektivní provoz a správnou funkci tepelného čerpadla by měla být výstupní teplota topné vody co nejnižší, z čehož vyplývá, že vhodné topné soustavy pro použití s TČ jsou

s tepelným spádem maximálně 55/45 °C (přívod/zpátečka). Teplotě ohřívání vody 55 °C odpovídá kondenzační teplota 60 °C, jež by při vyšších hodnotách již podstatně snižovala účinnost zařízení. U novostaveb je nejlepší využít tzv. nízkoteplotní systém s podlahovým vytápěním, jež pracuje v teplotním spádu obvykle 40/35 °C i nižším. Starší budovy je vhodné před instalací tepelného čerpadla zateplit, čímž se výrazně sníží tepelná ztráta objektu a výkon stávající topné soustavy bude dostačující, ačkoli byla původně navržena na vyšší teplotní spád (obvykle 90/70 °C). Pokud by výkon nestačil, musí být zvětšeny topné plochy v systému. [10, 14, 51]

4.1.1 Ekvitermní regulace

Výkon tepelné soustavy a zdroje tepla závisí na teplotě venkovního vzduchu. K regulaci teploty topné vody na základě venkovní teploty slouží tzv. ekvitermní regulátory, které zajišťují, že dodávané teplo a tepelné ztráty místnosti budou vždy v rovnováze a vnitřní teplota se tak nebude měnit. Ekvitermní regulátory ovládají zdroj tepla podle zvolené tzv. ekvitermní (topné) křivky, což je charakteristika popisující závislost teploty topné vody na venkovní teplotě pro vybranou teplotu místnosti. Soustava ekvitermních křivek se stanovuje dle požadované vnitřní teploty v objektu a nejnižší venkovní teploty, které bylo v dané lokalitě dosaženo. Na obr. 4.2 je uveden typický průběh ekvitermních charakteristik pro požadované teploty v místnosti 25 °C, 20 °C a 15 °C. [2, 52]



Obr. 4.2 Ekvitermní křivky [52]

4.1.2 Ohřev teplé užitkové vody

Tepelné čerpadlo je možné využít současně i pro přípravu teplé užitkové vody, je však třeba počítat s větším potřebným výkonem. Teplá voda by měla být ohřívána na 55 až 60 °C, kdežto teplotní spád nízkoteplotní otopné soustavy se pro nejnižší venkovní výpočtové teploty obvykle pohybuje v rozsahu od 40/30 °C do 55/45 °C, přičemž teplota topné vody se mění v závislosti na teplotě venkovního vzduchu (viz ekvitermní regulace). Teplá pitná voda je připravována na konstantní teplotu, jež je podstatně vyšší než potřebná teplota topné vody, což má nezanedbatelný vliv na provoz TČ. Vlivem ohřevu vody na vyšší teplotu klesá hodnota COP a zhoršuje se tak účinnost provozu tepelného čerpadla. Energeticky výhodnějším řešením může být ohřev vody na výstupu z kondenzátoru pouze na teplotu topné vody – TUV tepelným čerpadlem předeřhřívát a její dohřev na konečnou teplotu zajistit bivalentním zdrojem. [5, 10, 53]

4.2 Provoz tepelného čerpadla

Tepelná čerpadla jsou obvykle dimenzována na výkon, který pokryje 80 % tepelné ztráty objektu, přičemž k vykrytí energetických špiček (nejnižší venkovní teploty) slouží tzv. bivalentní zdroj. Tepelná čerpadla však mohou pracovat i monovalentně, kdy i při nejvyšší venkovní (výpočtové) teplotě plně pokryjí tepelnou ztrátu. [10, 51]

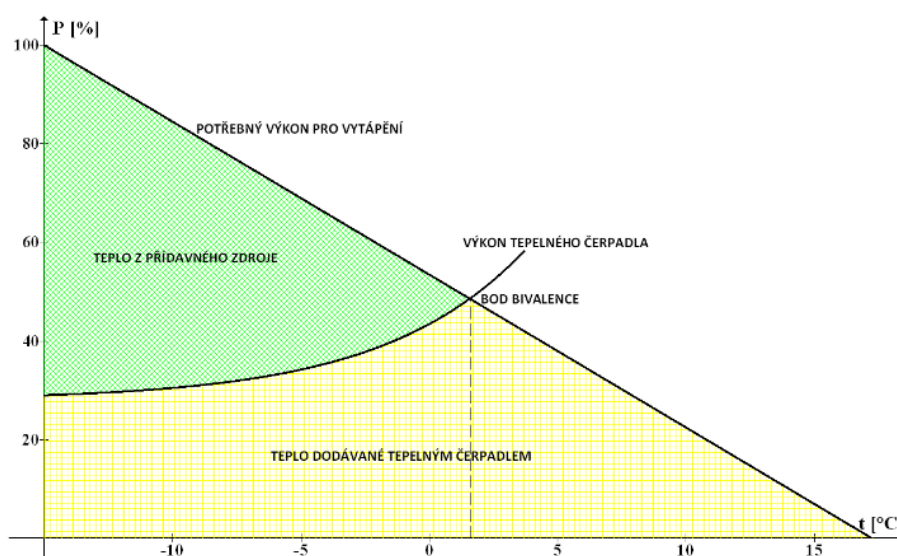
4.2.1 Monovalentní provoz

Monovalentní provoz tepelného čerpadla vyžaduje vysoké nároky na nízkopotenciální zdroj tepla a hodí se především pro nízkoenergetické, dobře izolované domy s tepelnou ztrátou pohybující se okolo 10 kW. Jelikož je v tomto případě TČ jediným zdrojem tepla, musí být jeho výkon navrhován na tepelnou ztrátu při výpočtové teplotě. Zároveň je nutné počítat s výkonem potřebným na odtávání námrazy a na pokrytí doby, kdy TČ nepracuje (vysoký tarif elektrické energie), takže je třeba určité předimenzování soustavy. [10, 51, 53]

Monovalentní provoz není příliš vhodný pro systémy získávající nízkopotenciální teplo z venkovního vzduchu, jelikož výkon těchto tepelných čerpadel klesá s venkovní teplotou, a tudíž je zapotřebí podstatně větší TČ než pro bivalentní provoz. Maximální navržený výkon je v tomto případě využíván jen velmi zřídka a zařízení tak nepracuje v optimálním režimu, takže provoz není příliš efektivní. Vzhledem k vysokým pořizovacím nákladům není toto řešení ani ekonomicky výhodné. [10, 51, 53]

4.2.2 Bivalentní provoz

Ve většině případů je nejvýhodnější kombinovat tepelné čerpadlo s bivalentním (záložním) zdrojem. U tohoto řešení pokrývá tepelné čerpadlo samostatně spotřebu tepla na vytápění jen do určité venkovní teploty, při jejímž podkročení už je jeho výkon nedostačující a musí být zapojen bivalentní zdroj, jenž dodá chybějící tepelnou energii. Teplota venkovního vzduchu, při níž je výkon TČ roven aktuální tepelné ztrátě objektu, se nazývá bodem bivalence, a pro TČ vzduch/voda by měla být v rozmezí $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota bivalence je dána tepelnou ztrátou objektu, druhem otopné plochy, výkonem tepelného čerpadla a maximální teplotou, na kterou je možno ohřát topnou vodu. Obrázek 4.3 znázorňuje bod bivalence jakožto průsečík křivek výkonu tepelného čerpadla a průběhu tepelné ztráty objektu v závislosti na teplotě venkovního vzduchu. [10, 14, 51, 53]



Obr. 4.3 Spotřeba tepla objektu a teplo dodávané TČ vzduch/voda v závislosti na venkovní teplotě [42]

Bivalentním zdrojem může být v principu jakékoli zařízení. Nejčastěji používané je elektrické topné zařízení zabudované přímo v tepelném čerpadle, ale lze využít i elektrokotel, plynový kotel či kotel na tuhá paliva. Hlavní podmínkou však je, aby byla zajištěna spolupráce obou zdrojů a bivalentní zdroj nebyl využíván nadměrně, čímž by klesla efektivita provozu TČ. Záložní zdroj by měl správně dodávat pouze cca 10 % celkové roční spotřeby tepla. [2, 10, 53]

Bivalentní provoz tepelného čerpadla může být buď alternativní, nebo paralelní. Při alternativním provozu pracuje TČ pouze do teploty bivalence, pak je odstaveno a celou spotřebu tepla pokrývá záložní zdroj. Paralelní provoz je znázorněn na obr. 4.3. Při poklesu venkovní teploty pod bod bivalence pracují v tomto případě oba zdroje současně, přičemž záložní zdroj pokrývá pouze část tepelné ztráty, na kterou TČ již nestačí. [14, 53]

4.3 Akumulace tepelné energie

Akumulace tepla je jedním z řešení pro snižování energetické náročnosti budov. Jedná se o uchovávání tepelné energie v případě přebytku pro její pozdější využití v době, kdy jí bude nedostatek, popřípadě bude zvýšená poptávka. [41, 54]

Do soustavy tepelného čerpadla, konkrétně mezi kondenzátor a topný systém, je proto vhodné zařadit akumulární nádrž. Akumulátor slouží k ustálení hydraulických poměrů v okruhu, jelikož umožňuje konstantní průtok topné vody z tepelného čerpadla do nádrže nezávisle na aktuálním potřebném množství vody odebírané pro vytápění. Teplo uložené v nádrži také slouží pro překlenutí období vysokého tarifu elektrické energie, kdy není TČ v provozu. Díky akumulátoru se zvětší objem vody v topné soustavě, čímž se zamezuje nevhodnému cyklování provozu tepelného čerpadla. Časté zapínání a vypínání totiž zkracuje životnost kompresoru. Do akumulární nádrže lze umístit elektrická tělesa, jež plní funkci doplňkového zdroje tepla. [5, 10, 14, 55]

4.3.1 Akumulace citelného tepla

Akumulace citelného tepla využívá tepelnou kapacitu pracovní látky v daném rozsahu provozních teplot. Jedná se o ohřev a ochlazování pracovní látky beze změny jejího skupenství. Odebírání tepla je provázeno změnou teploty pracovní látky, přičemž akumulovaná energie závisí přímo úměrně na rozdílu mezi počáteční a konečnou teplotou. Vhodnou pracovní látkou pro tento způsob akumulace je voda, neboť má velmi vysokou tepelnou kapacitu a zároveň je dostupná a levná. (Vzhledem k vyššímu rozsahu provozních teplot je v některých případech výhodné ukládat teplo do pevných látek, např. kamenivo nebo šterk.) Hlavní nevýhodou akumulace využívající citelného tepla je nízká hustota akumulace pohybující se mezi 100 až 300 MJ/m³ a s tím související potřeba nádrže o velkém objemu, a dále fakt, že se v průběhu vybíjení snižuje kvalita dodávaného tepla. [54, 56]

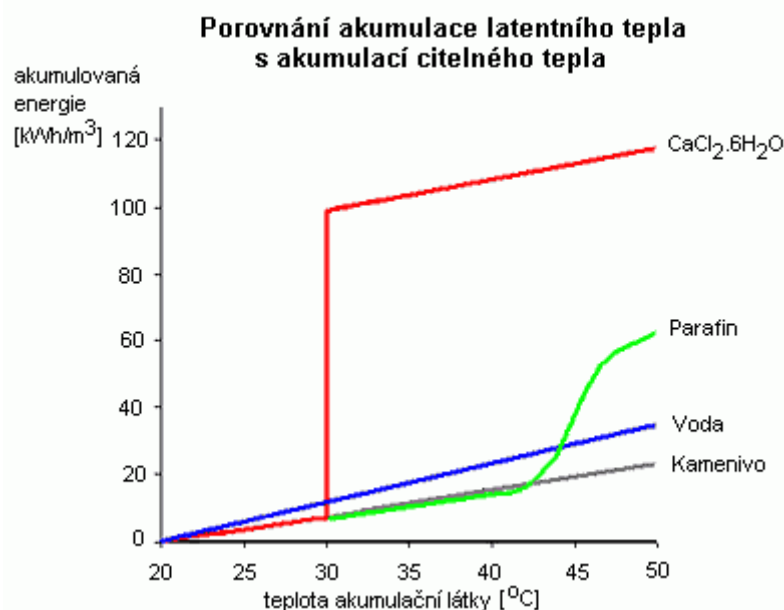
Vodní zásobníky ukládají teplo buď do užitkové vody, nebo do topné vody, případně mohou být kombinované a připravovat jak topnou vodu, tak TUV. Zásobníky teplé vody (bojlery) slouží jako zdroj TUV a podléhají hygienickým požadavkům na pitnou vodu. Musí být na vnitřní straně opatřeny speciální povrchovou úpravou s hygienickým atestem a vysokou trvanlivostí, neboť se mohou zanášet, jelikož pracují v otevřeném systému, kde je voda stále obměňována. Z důvodu minimalizace tepelných ztrát je nutné zásobníky tepla také dostatečně izolovat. [56, 57]

Pro účinnou akumulaci tepla je třeba dodržovat teplotní rozvrstvení objemu zásobníku, tzv. stratifikace. U nízkoteplotních systémů (40 – 60 °C) stačí přirozené teplotní rozvrstvení vlivem vztlakových sil (podle hustoty pracovní látky) ve stojatých štíhlých zásobnících. Vysokoteplotní systémy (60 – 90 °C) však vyžadují speciální stratifikační zásobníky s vestavbami, jež řídí ukládání tepla do vrstev o stejné nebo podobné teplotě. [56, 58]

4.3.2 Akumulace skupenského (latentního) tepla

Dalším možným způsobem je akumulace skupenského (jinak také latentního či vázaného) tepla uvolněného při fázové přeměně pracovní látky. V běžných aplikacích je využitelná pouze skupenská změna mezi tuhou látkou a kapalinou, jelikož fázový přechod mezi kapalinou a plynem je spojen s velkou změnou objemu pracovní látky a s tím souvisejícími vysokými nároky na akumulační zařízení. Kromě skupenského tepla tání/tunutí je i v tomto případě využíváno citelné teplo pracovní látky jak v pevném, tak v kapalném stavu. Jistou nevýhodou je však skutečnost, že média vhodná pro akumulaci latentního tepla mají nízké hodnoty tepelné kapacity. V průběhu fázové přeměny se nemění teplota pracovní látky, takže jsou při vhodném použití díky izotermní akumulaci menší ztráty. Další výhodou oproti akumulaci citelného tepla je potřeba menšího objemu nádrže v důsledku vyšší hustoty akumulace pohybující se mezi 200 až 500 MJ/m³. Jistou nevýhodou je však vyšší cena pracovní látky. [54, 56]

Látky používané pro akumulaci latentního tepla, tzv. PCM (*Phase Change Materials*), by měly mít vysokou hodnotu skupenského tepla tání, vysokou tepelnou vodivost a bod tání při teplotě vhodné pro danou aplikaci. Chemicky čisté látky, např. známá Glauberova sůl (dekahydrát síranu sodného – Na₂SO₄·10H₂O) tají při konstantní teplotě, kdežto směsi (např. parafinové vosky) tají v širším rozsahu teplot, jak je patrné z obr. 4.4. Výhodou anorganických látek (síran sodný) oproti organickým (parafin) je vyšší hodnota skupenského tepla tání a tepelné vodivosti, na druhou stranu jsou ale korozivní a jejich akumulační hustota se dlouhodobě snižuje. [54, 56, 59]



Obr. 4.4 Porovnání akumulace latentního tepla s akumulací citelného tepla [54]

4.4 Dotace a dvoutarifová sazba elektrické energie

Ministerstvo životního prostředí skrze Státní fond životního prostředí České republiky podporuje instalaci nových tepelných čerpadel prostřednictvím programů Nová zelená úsporám a Kotlíkové dotace. Hlavním cílem těchto programů je zlepšit stav životního prostředí snížením produkce emisí znečišťujících látek a skleníkových plynů a v konečné spotřebě dosáhnout úspor energie. Nová zelená úsporám podporuje prostřednictvím dotací např. snižování energetické náročnosti budov (zateplení), stavbu pasivních domů, využívání obnovitelných zdrojů energie (solární systémy) či zpětného získávání tepla – rekuperace. V rámci tohoto

programu lze získat dotace také na výměnu elektrického vytápění za systém s tepelným čerpadlem, výše podpory viz tabulka 4.1. Kotlíkové dotace jsou určeny na výměnu starých neekologických kotlů na tuhá paliva za nové nízkoemisní zdroje vytápění, mezi které patří i všechny typy tepelných čerpadel. Pro ně je výše podpory až 80 % způsobilých výdajů, nejvýše však 120 000 Kč.⁴ [60, 61, 62, 63]

Tab. 4.1 Nová zelená úsporám – dotace na tepelné čerpadlo [61]

| Typ tepelného čerpadla | Výše podpory [Kč/dům] | |
|------------------------|---------------------------|---------------|
| | v kombinaci se zateplením | bez zateplení |
| vzduch/voda | 75 000 | 60 000 |
| země/voda | 100 000 | 80 000 |
| voda/voda | 100 000 | 80 000 |

Majitelé tepelných čerpadel mohou také využívat tzv. dvoutarifovou sazbu elektrické energie určenou domácnostem, které využívají elektřinu k vytápění. Tato distribuční sazba nemá v průběhu dne stejnou cenu silové elektřiny, ta se mění podle vysokého tarifu (VT) a nízkého tarifu (NT) – dříve denní a noční proud. V době nízkého tarifu (8 až 22 hodin denně podle dané sazby) je cena elektrické energie nižší než v době vysokého tarifu. Pro majitele tepelných čerpadel, kteří splní podmínky přiznání dané distribuční sazby, jsou v současnosti určeny sazby D 56d – Dvoutarifová sazba pro vytápění s tepelným čerpadlem uvedeným do provozu od 1. dubna 2005 a operativním řízením doby platnosti nízkého tarifu po dobu 22 hodin, a D 57d – Dvoutarifová sazba pro vytápění topným elektrickým spotřebičem a operativním řízením doby platnosti nízkého tarifu po dobu 20 hodin. Ceny za 1 MWh elektrické energie od různých dodavatelů pro vybrané sazby jsou v tabulkách 4.2 a 4.3. [64, 65, 66]

Tab. 4.2 Sazba D 56d – cena elektřiny ve vysokém a nízkém tarifu [66]

| Sazba D 56d | | |
|-------------|-----------------|-------------|
| Dodavatel | Cena 1 MWh [Kč] | |
| | vysoký tarif | nízký tarif |
| E.ON | 3613,45 | 2805,77 |
| PRE | 2976,01 | 2540,15 |
| ČEZ | 2790,14 | 2507,98 |

Tab. 4.3 Sazba D 57d – cena elektřiny ve vysokém a nízkém tarifu [66]

| Sazba D 57d | | |
|-------------|-----------------|-------------|
| Dodavatel | Cena 1 MWh [Kč] | |
| | vysoký tarif | nízký tarif |
| E.ON | 3497,54 | 2864,2 |
| PRE | 3096,63 | 2773,05 |
| ČEZ | 2671,78 | 2594,12 |

⁴ Program Nová zelená úsporám končí v roce 2021. Závěrečné kolo programu Kotlíkové dotace probíhá v současnosti (rok 2019).

5 ANALÝZA PROVOZNÍCH DAT TEPELNÉHO ČERPADLA

Následující kapitola se zabývá vyhodnocením provozních dat tepelného čerpadla používaného pro vytápění rodinného domu. Pro potřeby této diplomové práce byla vybrána data pocházející z topné sezóny mezi lety 2017 a 2018.

5.1 Popis objektu

Tepelné čerpadlo je instalováno v řadovém domě situovaném v blízkosti Kraví hory v Brně Žabovřeskách. Jedná se o krajní dům mající jednu stěnu společnou s vedlejším rodinným domem (viz obr. 5.1). Dům je kompletně zateplen včetně střechy, plastová okna jsou opatřena izolačními trojskly. V celém domě jsou pro vytápění použity litinové radiátory Viadrus Kalor dimenzované pro nízkoteplotní vytápění s maximální teplotou topné vody do 45 °C. Teplota v místnostech je individuálně nastavována pomocí termostatických ventilů na každém radiátoru. V koupelnách je instalováno elektrické podlahové vytápění formou topných rohoží.

Výkon tepelného čerpadla byl projektově navržen pro vytápění celého domu, kde jsou dvě bytové jednotky 4+KK, každá o podlahové ploše cca 115 m². V topné sezóně 2017/2018 byl vytápěn pouze byt nacházející se v prvním nadzemním podlaží, byt ve druhém podlaží byl temperován na teplotu v místnostech cca 12 °C.



Obr. 5.1 Řadový dům v Brně Žabovřeskách (zdroj: Google Maps)

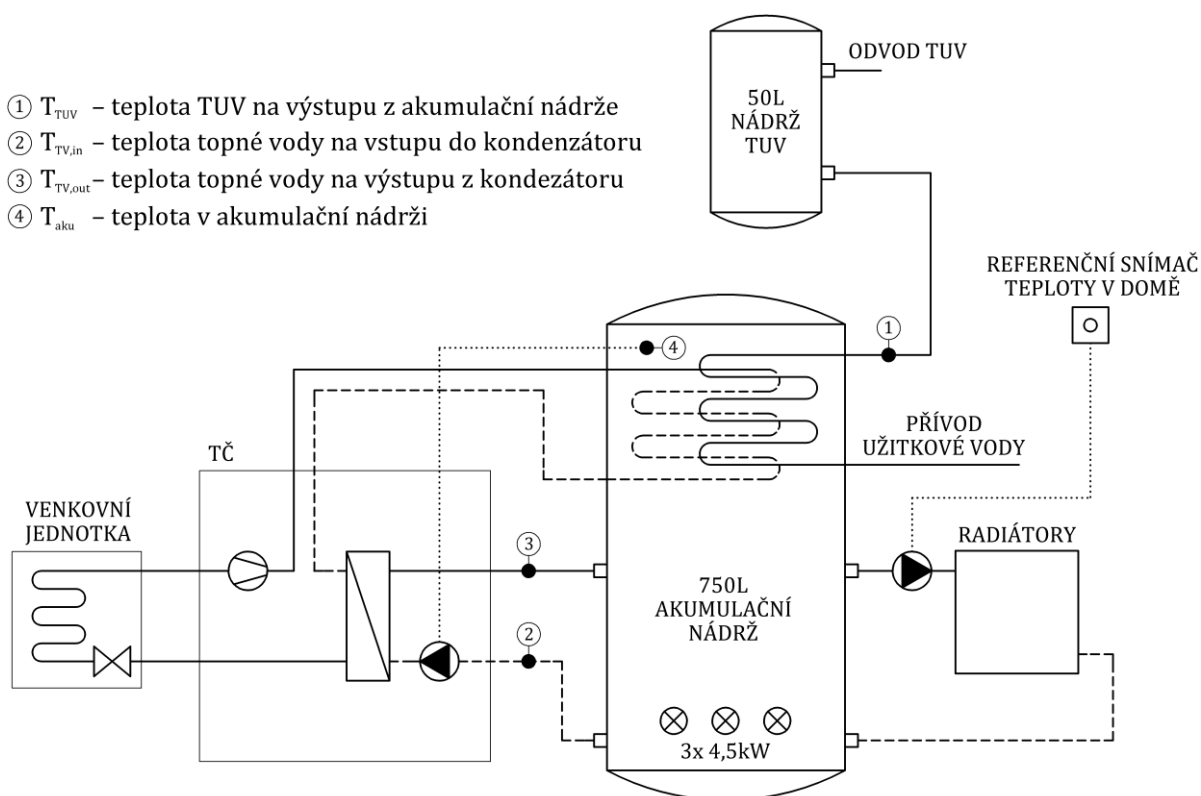
5.2 Charakteristika tepelného čerpadla

Pro daný objekt bylo zvoleno tepelné čerpadlo Chameleon vzduch/voda českého výrobce TC MACH. Schéma zapojení soustavy tepelného čerpadla je zobrazeno na obr. 5.2.

Sekundární okruh TČ je rozdělen na dvě nezávislé části, mezi nimiž se nachází akumulční nádrž o objemu 750 litrů. První okruh je řízen teplotou vody v nádrži, jež je trvale nastavena na 45 °C. Jestliže snímač teploty umístěný v horní části nádrže (bod 4 na schématu) zaznamená teplotu vody nižší než 42 °C, spouští se automaticky kompresor a oběhové čerpadlo topné vody mezi kondenzátorem a akumulátorem (viz obr. 5.2). Je nutno dodat, že tepelné čerpadlo je spuštěno pouze v případě nízkého tarifu elektrické energie. Pokud je vysoký tarif, voda v nádrži se dále ochlazuje. Druhý okruh je řízen teplotou vzduchu uvnitř domu. Pokud tato teplota klesne pod nastavených 21 °C, spouští se oběhové čerpadlo čerpající vodu z akumulátoru do radiátorů (viz obr. 5.2). Výhodou tohoto systému je fakt, že tepelné čerpadlo nemusí okamžitě reagovat na každý pokles teploty v domě. (Další výhody použití akumulční nádrže viz kap. 4.3.)

V akumulční nádrži také dochází k ohřevu užitkové vody. Pro tyto účely je využívána přehřátá pára za kompresorem, která ještě před vstupem do kondenzátoru prochází systémem výměníků v akumulátoru, kde předává teplo vodě. TUV je následně odváděna do původního klasického elektrického bojleru, v němž může být v případě potřeby dohřívána.

V dolní části nádrže je umístěn bivalentní zdroj, jímž jsou tři elektrické topné patrony, každá o výkonu 4,5 kW. Ty jsou připojovány v případě, kdy je teplota venkovního vzduchu tak nízká, že TČ nezvládá dodávat požadovaný výkon.



Obr. 5.2 Schéma zapojení tepelného čerpadla

Venkovní jednotka (pojmenovaná výrobcem „velký šíp“) vyfocená na obr. 5.3 je složena ze dvou výparníků. K jejich odtávání slouží patentovaný systém VHM, jehož podstatou je využívání zbytkového tepla z chladicího okruhu. Jak již bylo zmiňováno v kapitole 3.1, při provozu dochází ke střídání výparníků (jeden pracuje, druhý odtává), čímž je zajištěn nepřetržitý chod a ustálený topný výkon. [67]



Obr. 5.3 Venkovní jednotka tepelného čerpadla

Na fotografii na obr. 5.4 je vnitřní jednotka tepelného čerpadla s akumulací nádrží, nad níž je umístěn původní bojler na TUV. Systém je uložen ve sklepní místnosti domu.



Obr. 5.4 Vnitřní jednotka tepelného čerpadla s akumulací nádrží

V následující tabulce 5.1 jsou výrobcem uváděné hodnoty topného výkonu, elektrického příkonu a topného faktoru pro vybrané teploty venkovního vzduchu (A) a topné vody (W). (Označování viz kapitola 2.4.1.)

Tab. 5.1 Parametry tepelného čerpadla

| MACH CHAMELEON 11,6 | A7/W50 | A0/W50 | A-15/W50 | A7/W35 | A2/W35 | A-15/W35 |
|------------------------|--------|--------|----------|--------|--------|----------|
| Topný výkon [kW] | 11,4 | 9,16 | 6,22 | 12,25 | 10,05 | 6,25 |
| Elektrický příkon [kW] | 3,94 | 3,81 | 3,24 | 3,12 | 2,93 | 2,85 |
| Topný faktor (COP) | 2,9 | 2,4 | 1,9 | 3,9 | 3,4 | 2,2 |

5.3 Poskytnutá naměřená data

Podrobná data o provozu tepelného čerpadla jsou zákazníkům poskytována od výrobce TC MACH. Pro účely této diplomové práce byla zvolena data z topné sezóny 2017/2018. Hodnoty byly snímány s přibližně dvouminutovou vzorkovací periodou, která nebyla dokonale konstantní. Poskytnutá data jsou zaznamenávána od 10. září 2017 do 14. května 2018, přičemž zcela chybí hodnoty pro dny mezi 26. listopadem a 6. prosincem 2017 a pro 28. únor 2018. Pro 10. září, 25. listopad, 7. prosinec a 14. květen jsou k dispozici data jen z části dne.

Pro každé snímání hodnot je znám přesný čas záznamu – měsíc, den, hodina, minuta, sekunda. Zaznamenávány byly hodnoty teploty TUV na výstupu z akumulární nádrže (bod 1 na schématu obr. 5.2), teploty topné vody na vstupu do kondenzátoru (bod 2) a na výstupu z kondenzátoru (bod 3), teploty v akumulární nádrži (bod 4) či teploty venkovního vzduchu⁵. V každém časovém úseku jsou uvedeny dvouhodnotové informace (0 nebo 1) o běhu kompresoru a spouštění bivalence. Pro každý den je znám počet hodin běhu kompresoru (zjištěno, že zaokrouhlován vždy směrem dolů na celé hodiny), a v hodinách je také uveden celkový čas chodu kompresoru a bivalence za celou topnou sezónu.

Kromě výrobcem naměřených údajů poskytl majitel tepelného čerpadla též denní spotřebu elektrické energie domácnosti odečítanou z elektroměru pro vysoký a nízký tarif. Údaje nejsou k dispozici za celou topnou sezónu, jelikož se zapisováním hodnot bylo započato až 5. prosince 2017. Záznamy zároveň nebyly vedeny každý den.

Od společnosti E.ON byly získány údaje o časech nízkého tarifu v období topné sezóny 2017/2018 pro distribuční sazbu D 57d v dané lokalitě. Jedná se o dvoutarifovou sazbu s dobou platnosti nízkého tarifu 20 hodin denně (viz kap. 4.4). V tabulce 5.2 jsou dopočítány časy vysokého tarifu (období VT je v průběhu dne rozděleno do čtyř hodinových časových pásem).

Tab. 5.2 Pásma vysokého tarifu pro jednotlivá období topné sezóny 2017/2018

| 1. 9. až 29. 10. 2017 | | | | | | | |
|-----------------------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| Pásmo VT1 | | Pásmo VT2 | | Pásmo VT3 | | Pásmo VT4 | |
| | od | do | od | do | od | do | od |
| po–pá | 7:30 | 8:30 | 9:30 | 10:30 | 12:30 | 13:30 | 14:30 |
| so–ne | 9:15 | 10:15 | 12:45 | 13:45 | 17:45 | 18:45 | 20:30 |
| | | | | | | | 21:30 |
| 30. 10. 2017 až 31. 1. 2018 | | | | | | | |
| Pásmo VT1 | | Pásmo VT2 | | Pásmo VT3 | | Pásmo VT4 | |
| | od | do | od | do | od | do | od |
| po–pá | 8:15 | 9:15 | 11:30 | 12:30 | 14:30 | 15:30 | 18:15 |
| so–ne | 10:15 | 11:15 | 13:15 | 14:15 | 16:15 | 17:15 | 19:15 |
| | | | | | | | 20:15 |

⁵ Čidlo teploty venkovního vzduchu je umístěno na fasádě domu, proto byla provedena korekce a venkovní teplota ponížena o 1 °C – dle meteostanice vzdálené cca 10 m od domu.

Tab. 5.2 Pásma vysokého tarifu pro jednotlivá období topné sezóny 2017/2018 (pokračování)

| 1. 2. až 25. 3. 2018 | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| Pásmo VT1 | | | Pásmo VT2 | | Pásmo VT3 | | Pásmo VT4 | |
| | od | do | od | do | od | do | od | do |
| po–pá | 8:15 | 9:15 | 11:30 | 12:30 | 14:30 | 15:30 | 18:15 | 19:15 |
| so–ne | 10:15 | 11:15 | 13:15 | 14:15 | 17:45 | 18:45 | 19:45 | 20:45 |
| 26. 3. až 31. 8. 2018 | | | | | | | | |
| Pásmo VT1 | | | Pásmo VT2 | | Pásmo VT3 | | Pásmo VT4 | |
| | od | do | od | do | od | do | od | do |
| po–pá | 7:30 | 8:30 | 9:30 | 10:30 | 12:30 | 13:30 | 14:30 | 15:30 |
| so–ne | 9:15 | 10:15 | 12:45 | 13:45 | 15:45 | 16:45 | 20:30 | 21:30 |

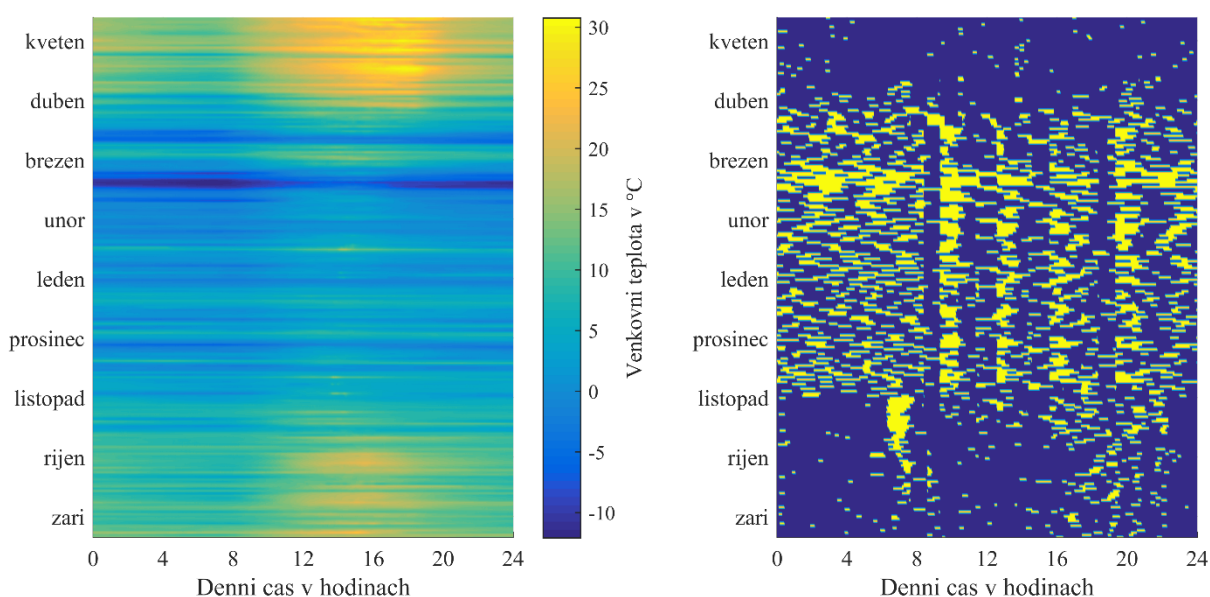
5.4 Výpočet množství elektrické energie spotřebované tepelným čerpadlem

Množství elektrické energie (dále jen energie) spotřebované tepelným čerpadlem bylo stanoveno dvěma způsoby. Prvním z nich je výpočet spotřeby energie pomocí hodnot elektrického příkonu daného výrobcem pro vybrané teploty. Pro druhý způsob bylo využito zapisovaných hodnot spotřeby domácnosti odečítaných z elektroměru.

5.4.1 Výpočet denní doby běhu kompresoru

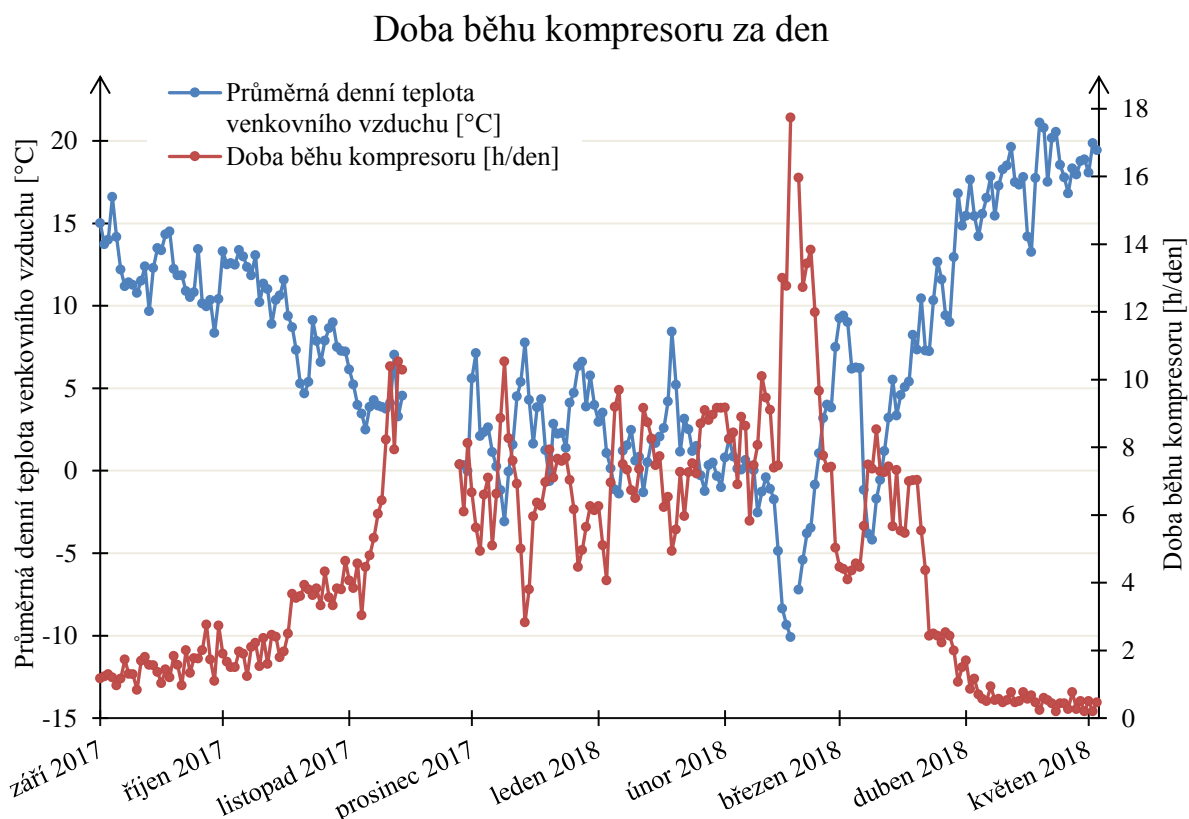
Součástí měření poskytnutých výrobcem byly i informace o běhu kompresoru v každém časovém intervalu (0 nebo 1 – běžel/neběžel). Tyto hodnoty jsou graficky znázorněny na obr. 5.5 v pravém grafu, přičemž časové okamžiky, kdy běžel kompresor, jsou označeny žlutě. V levém grafu je pro porovnání vynesena průběh teplot venkovního vzduchu.

Z grafů je patrné, že ve dnech s nejnižší teplotou venkovního vzduchu (např. začátek března), byl kompresor v provozu nejdelší dobu (největší hustota žluté barvy). Na pravém grafu lze také dobře vidět pásma vysokého tarifu, ve kterých kompresor neběžel. Jak je rovněž zřejmé z tabulky 5.2, časy vysokého tarifu se vždy po několika měsících mění a o víkendech jsou pásma VT v jiné hodiny než v pracovní dny, proto jsou pruhy v grafu přerušované a nejsou úplně zřetelné.

**Obr. 5.5** Grafické znázornění průběhu venkovní teploty a doby běhu kompresoru

Pro výpočet denní doby běhu kompresoru bylo nejprve třeba stanovit přesnou časovou délku úseku mezi každými dvěma jednotlivými měřeními. Následně byly pomocí dvouhodnotové informace (0 nebo 1) o běhu kompresoru v daném časovém úseku vyfiltrovány časové úseky, v nichž byl kompresor v provozu. Z těchto vyfiltrovaných časových úseků byla dále spočítána sumární hodnota pro každý den. Doby běhu kompresoru v jednotlivých dnech jsou vyneseny v grafu na obr. 5.6 (červená křivka). Pro porovnání jsou v grafu též hodnoty průměrné denní teploty venkovního vzduchu (modrá křivka).

Z grafu vyplývá, že s klesající venkovní teplotou roste denní doba běhu kompresoru. Extrémním dnem byl 27. únor 2018, kdy průměrná venkovní teplota dosáhla hodnoty $-10,08\text{ }^{\circ}\text{C}$ a kompresor byl v chodu téměř 18 hodin.



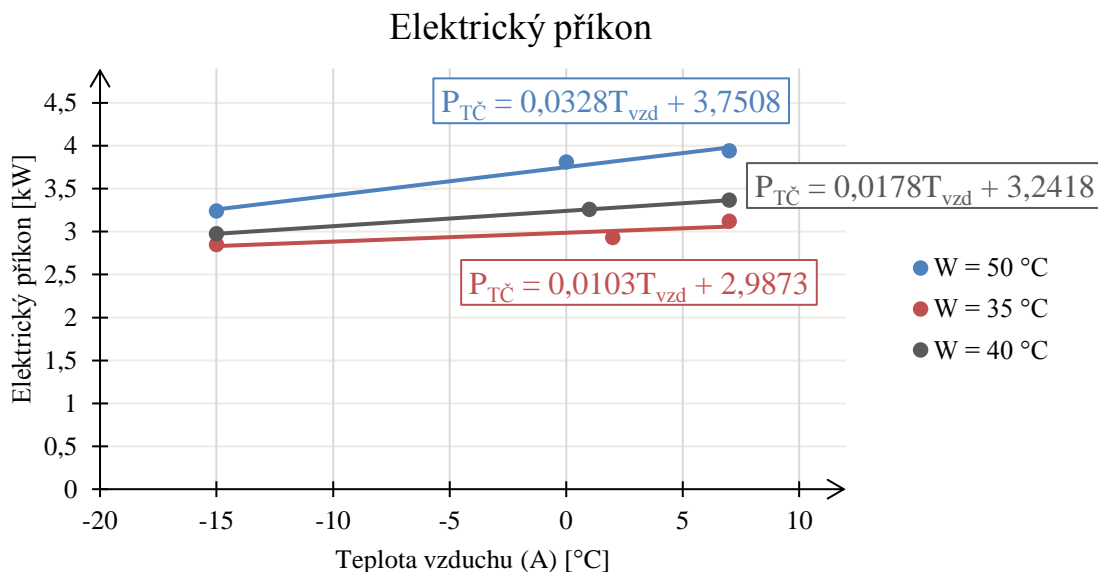
Obr. 5.6 Doba běhu kompresoru za den

5.4.2 Výpočet dle hodnot elektrického příkonu udávaných výrobcem

Jedním z parametrů tepelného čerpadla uváděných výrobcem pro vybrané teploty vzduchu (A) a topné vody (W) je elektrický příkon (viz tabulka 5.1). Hodnoty příkonu byly vyneseny do grafu (obr. 5.7) v závislosti na teplotě vzduchu (A) podle tabulky. Body byly proloženy přímkami dle teplot topné vody (W) – údaje pro $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ jsou v grafu znázorněny modře, údaje pro $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ červeně.

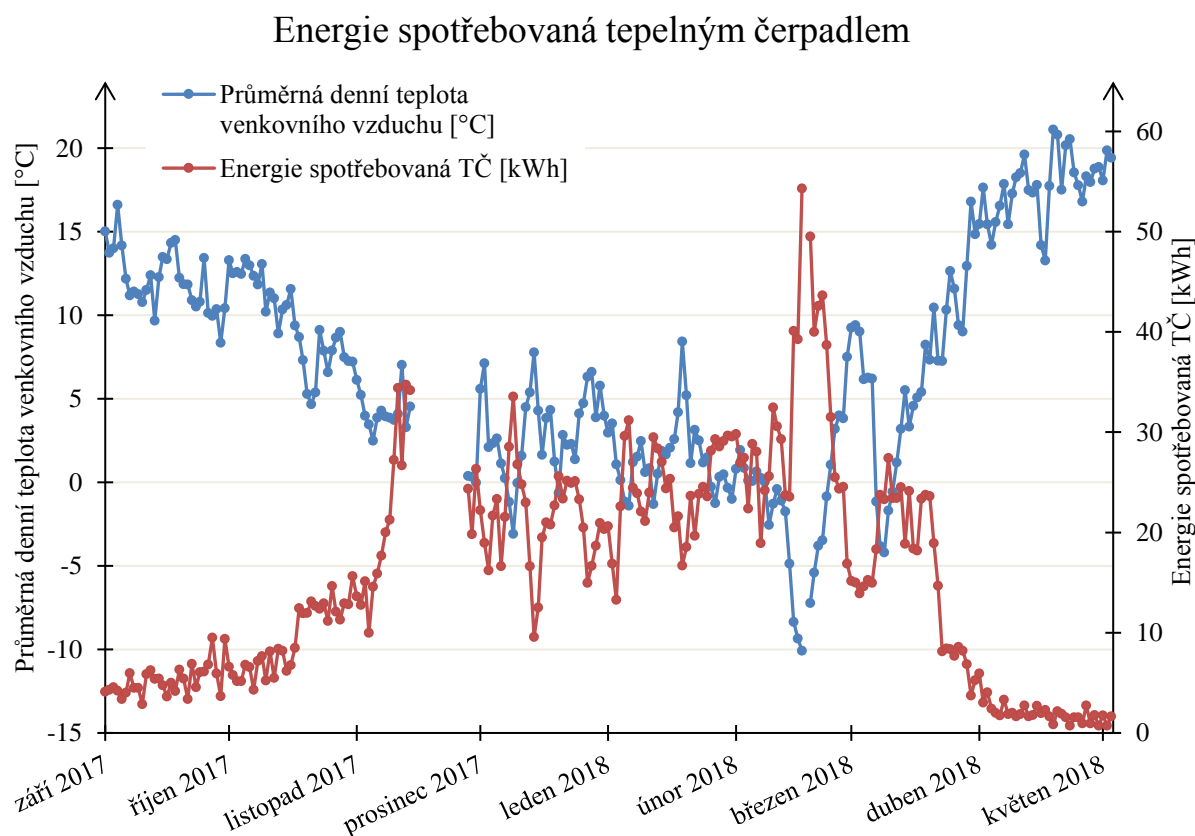
Následně byla spočítána průměrná teplota topné vody na výstupu z kondenzátoru (viz schéma obr. 5.2 bod 3), jež je rovna $40,003\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z rovnic přímek pro teplotu topné vody $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ byla pomocí lineární interpolace stanovena rovnice přímky pro $40\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$P_{T\check{C}} = 0,0178T_{vzd} + 3,2418 \quad (5.1)$$



Obr. 5.7 Závislost elektrického příkonu na teplotě venkovního vzduchu

Na základě rovnice 5.1 byl spočítán elektrický příkon tepelného čerpadla pro teplotu venkovního vzduchu v každém časovém úseku. Příkon byl dále násoben dobou běhu kompresoru, čímž se získala energie spotřebovaná tepelným čerpadlem. (Pro časové úseky, v nichž kompresor neběžel, je rovna nule.) Energie spotřebovaná TČ za den se spočítala jako suma všech časových úseků odpovídajících danému dni a je společně s teplotou venkovního vzduchu vynesena v grafu na obr. 5.8. Lze říci, že s klesající venkovní teplotou roste spotřeba elektrické energie, přičemž v extrémní den 27. únor 2018 dosáhla hodnoty 54,3 kWh.



Obr. 5.8 Energie spotřebovaná tepelným čerpadlem

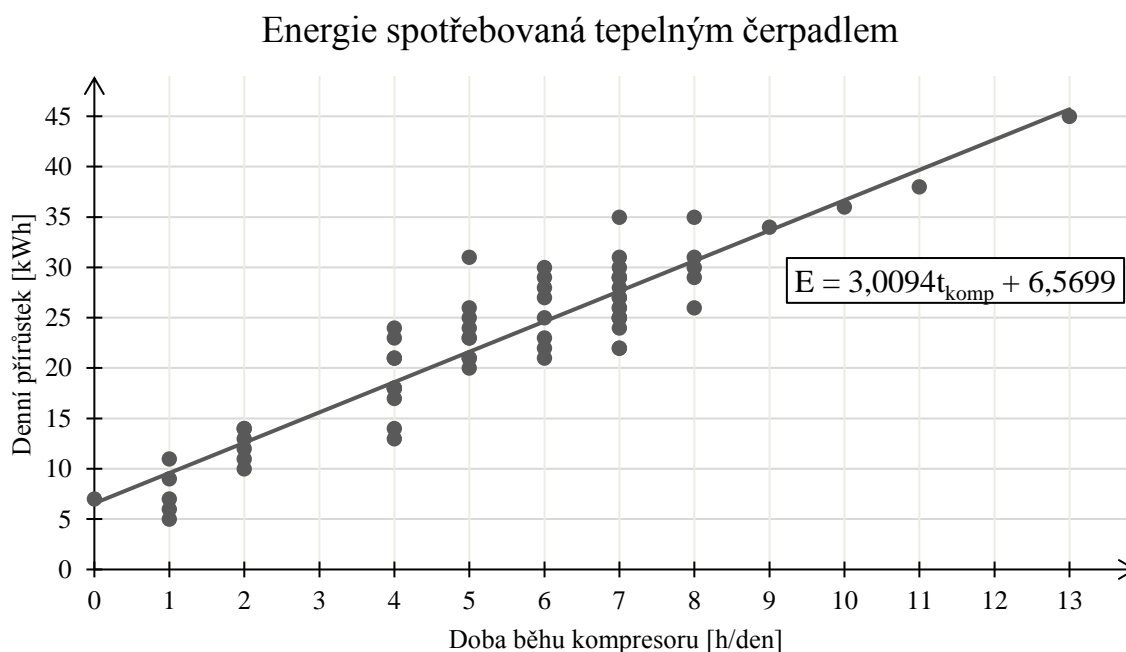
5.4.3 Výpočet dle denní spotřeby elektrické energie odečítané z elektroměru

Pro výpočet energie spotřebované tepelným čerpadlem za den byly použity pouze údaje odečítané z elektroměru pro nízký tarif, jelikož kompresor by se v době vysokého tarifu ani v případě potřeby neměl spouštět.

Ze zapisovaných údajů spotřeby domácnosti byly spočítány denní přírůstky, které se následně vynesly do grafu v závislosti na době běhu kompresoru za daný den – obr. 5.9. (Údaje o chodu kompresoru v hodinách za den poskytuje výrobce TČ svým zákazníkům.) Body byly proloženy přímkou a z její rovnice (5.2) byla zjištěna spotřeba samotné domácnosti (v případě kdy kompresor neběží), jejíž zaokrouhlená hodnota je rovna 6,57 kWh.

$$E = 3,0094t_{komp} + 6,5699 \quad (5.2)$$

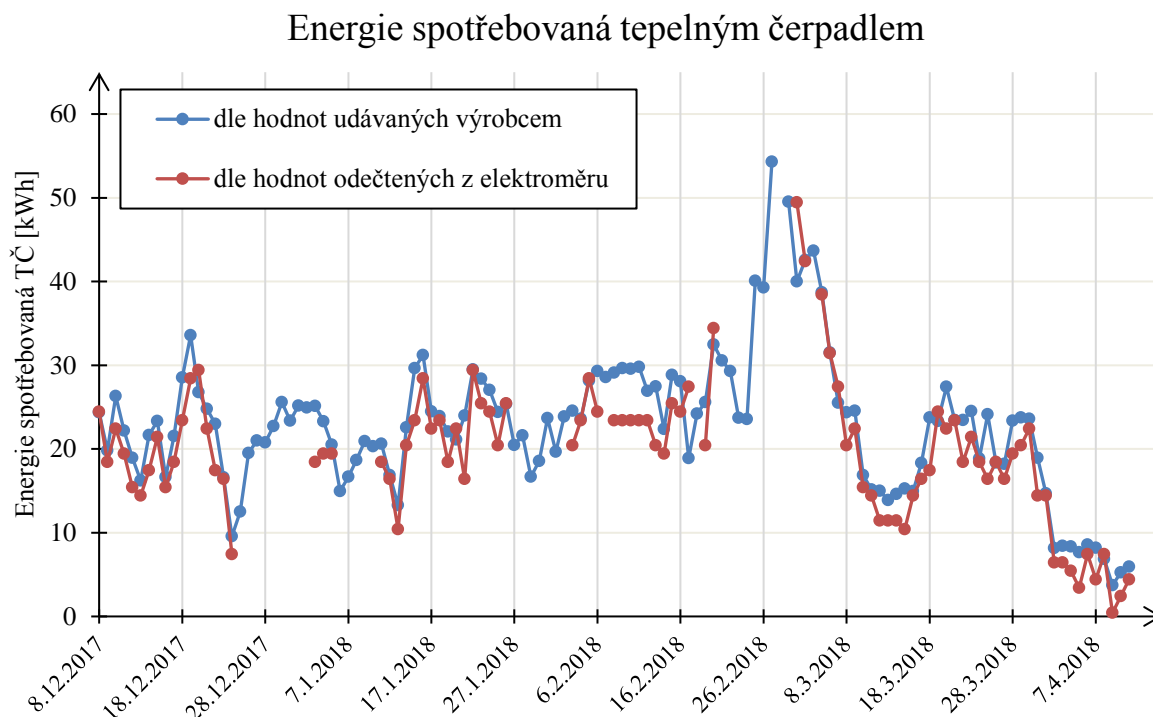
Tato hodnota byla odečtena od celkové spotřeby domácnosti za den, čímž se získala energie spotřebovaná pouze tepelným čerpadlem.



Obr. 5.9 Závislost denní spotřeby domácnosti na době běhu kompresoru

V následujícím grafu na obr. 5.10 jsou pro porovnání vyneseny průběhy spotřeby tepelného čerpadla získané oběma způsoby, modře dle hodnot udávaných výrobcem a červeně dle hodnot odečtených z elektroměru. Jelikož údaje odečítané z elektroměru nebyly k dispozici pro každý den, jsou i hodnoty v grafu pouze pro vybrané dny.

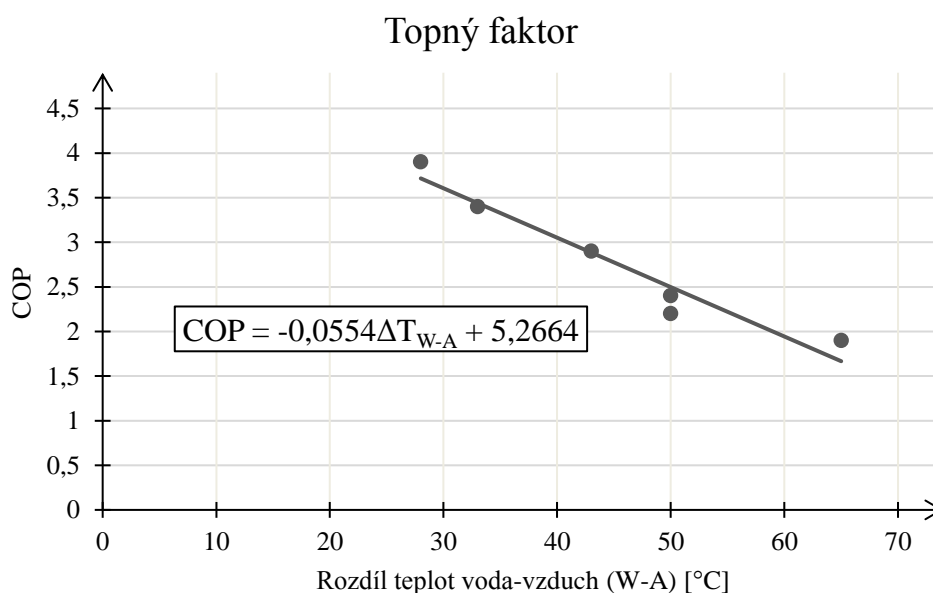
Z grafu je patrné, že výsledky obou způsobů výpočtu se výrazně neliší. Obecně lze říci, že hodnoty získané odečítáním spotřeby z elektroměru jsou nižší, což může být způsobeno faktem, že pro jejich výpočet byly použity denní časy běhu kompresoru přímo získané od výrobce, kdežto v prvním způsobu výpočtu byla doba běhu kompresoru dopočítána přesněji (viz kap. 5.3.1). Výrobce denní dobu běhu kompresoru zaokrouhluje na hodiny a to vždy směrem dolů, časy jsou potom tedy vždy nižší oproti přesným hodnotám.



Obr. 5.10 Porovnání variant výpočtu energie spotřebované tepelným čerpadlem

5.5 Výpočet topného faktoru COP

Mezi parametry tepelného čerpadla udávanými výrobcem jsou i topné faktory *COP* pro vybrané teploty vzduchu (A) a topné vody (W), viz tabulka 5.1. Hodnoty *COP* byly vyneseny do grafu (obr. 5.11) v závislosti na rozdílu teplot topné vody a vzduchu (W-A) dle tabulky.



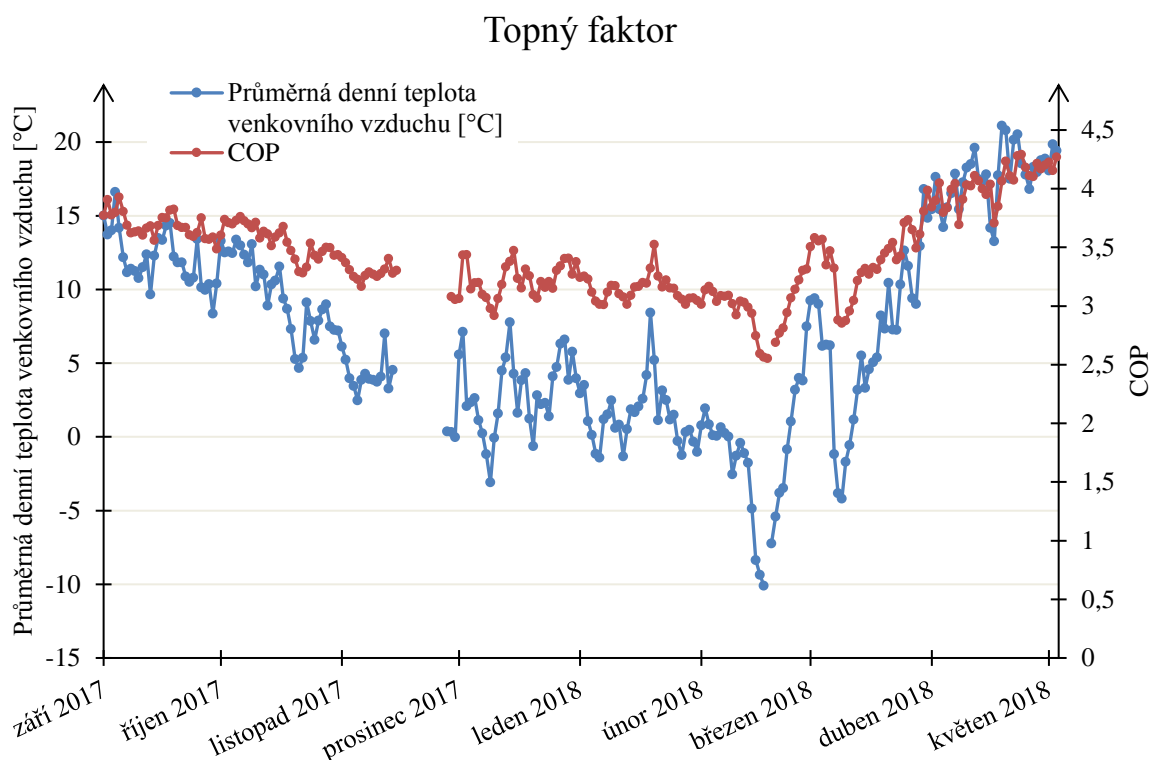
Obr. 5.11 Závislost topného faktoru na rozdílu teplot voda-vzduch

Body byly proloženy přímkou, pro níž platí:

$$COP = -0,0554\Delta T_{W-A} + 5,2664 \quad (5.3)$$

Na základě rovnice 5.3 byl spočítán topný faktor tepelného čerpadla pro rozdíl teplot topné vody na výstupu z kondenzátoru (viz schéma obr. 5.2 bod 3) a venkovního vzduchu v každém časovém úseku. Průměrný denní topný faktor je spolu s venkovní teplotou graficky znázorněn na obr. 5.12.

Z grafu vyplývá, že se snižující se teplotou venkovního vzduchu se zhoršuje i *COP*. Maximální hodnota topného faktoru, které bylo dosaženo v topné sezóně (v konkrétním časovém úseku), činí 4,82. Minimální dosažená hodnota *COP* je 2,13.



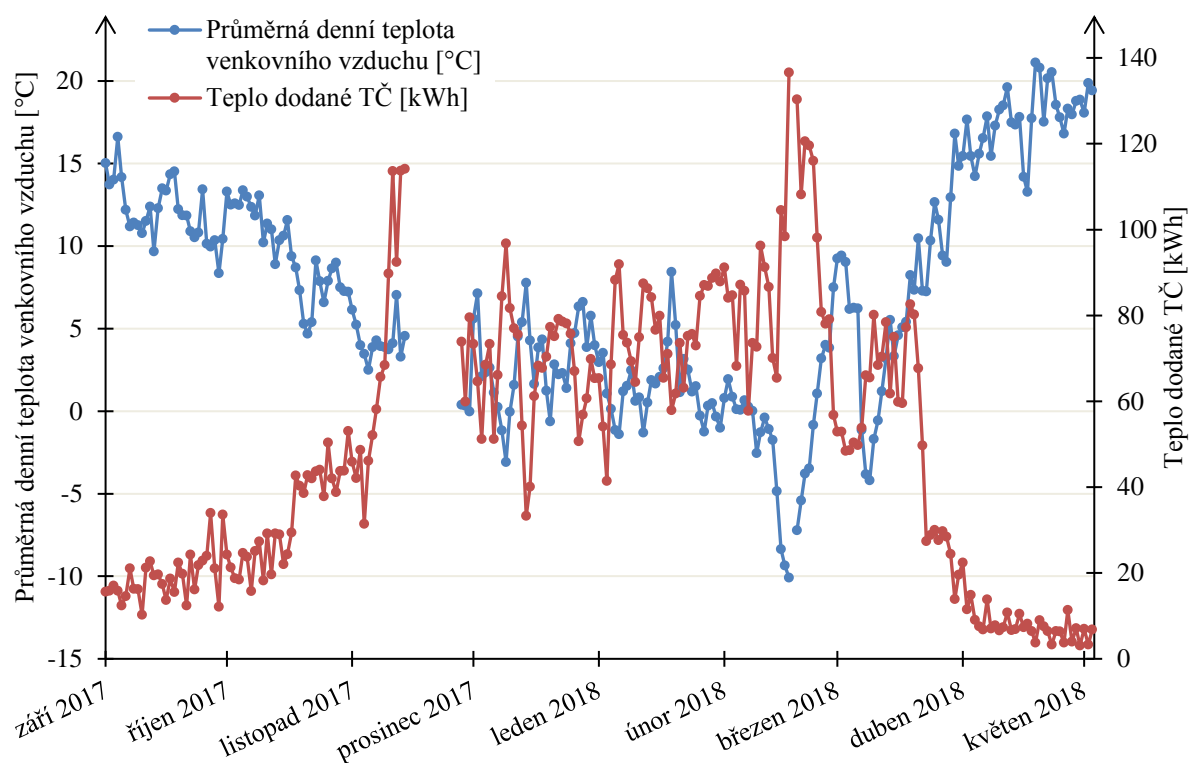
Obr. 5.12 Průměrný denní topný faktor

5.6 Výpočet množství tepla dodaného tepelným čerpadlem

Množství tepla dodané tepelným čerpadlem bylo získáno součinem topného faktoru a energie spotřebované tepelným čerpadlem pro každý časový úsek. Denní hodnoty dodávané energie byly spočítány jako suma všech časových úseků odpovídajících danému dni.

V následujícím grafu (obr. 5.13) jsou zobrazeny průběhy tepla dodávaného tepelným čerpadlem a průměrné denní teploty venkovního vzduchu pro topnou sezónu 2017/2018. Graf potvrzuje, že čím nižší je venkovní teplota, tím větší množství tepelné energie musí TČ dodávat. Největší množství energie – 136,6 kWh bylo dodáno 27. února 2018.

Teplo dodané tepelným čerpadlem



Obr. 5.13 Množství tepla dodaného tepelným čerpadlem

5.7 Výpočet sezónního topného faktoru SCOP

Sezónní topný faktor byl spočítán jako podíl sumy součinů COP a tepla dodaného tepelným čerpadlem v každém časovém okamžiku k sumě tepla dodaného tepelným čerpadlem v každém časovém okamžiku (viz rovnice 5.4).

$$SCOP = \frac{\sum (COP * \text{teplo dodané tepelným čerpadlem})}{\sum \text{teplo dodané tepelným čerpadlem}} \quad (5.4)$$

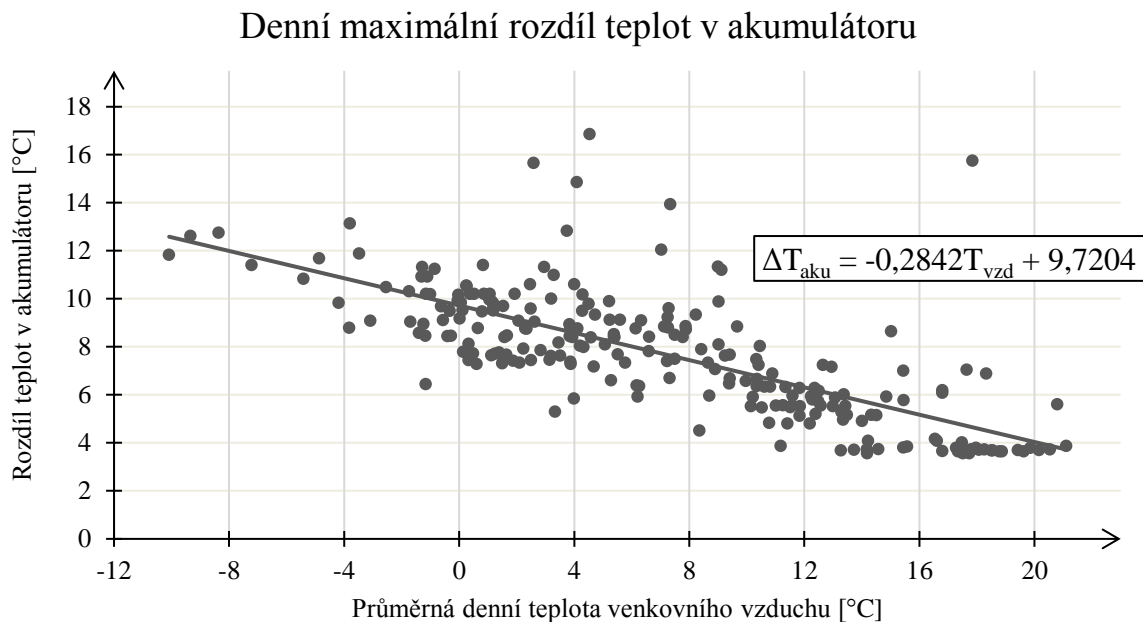
$$SCOP = 3,2$$

5.8 Teplota vody v akumulční nádrži

Součástí soustavy tepelného čerpadla je akumulční nádrž o objemu 750 litrů, která odděluje průtok tepelným čerpadlem a průtok topnou soustavou (viz obr. 5.2).

Jak již bylo řečeno v kapitole 5.2, teplota vody v nádrži je trvale nastavena na 45 °C, což je maximální teplota pro instalované nízkoteplotní vytápění. V případě, že se teplota vody v nádrži ochladí pod 42 °C, spustí se tepelné čerpadlo a vodu dohřeje. Pokud je však třeba vytápět (čerpat topnou vodu z akumulátoru) v době vysokého tarifu, kdy TČ neběží, akumulátor se dále vybíjí a teplota v něm klesá i pod 42 °C. Vzhledem k vysokému tarifu tak může být rozdíl teplot v nádrži během dne i podstatně větší než původně nastavené optimální 3 °C.

V grafu na obr. 5.14 jsou vyneseny hodnoty denního maximálního rozdílu teplot v akumulční nádrži v závislosti na venkovní teplotě.



Obr. 5.14 Denní maximální rozdíl teplot v akumulční nádrži

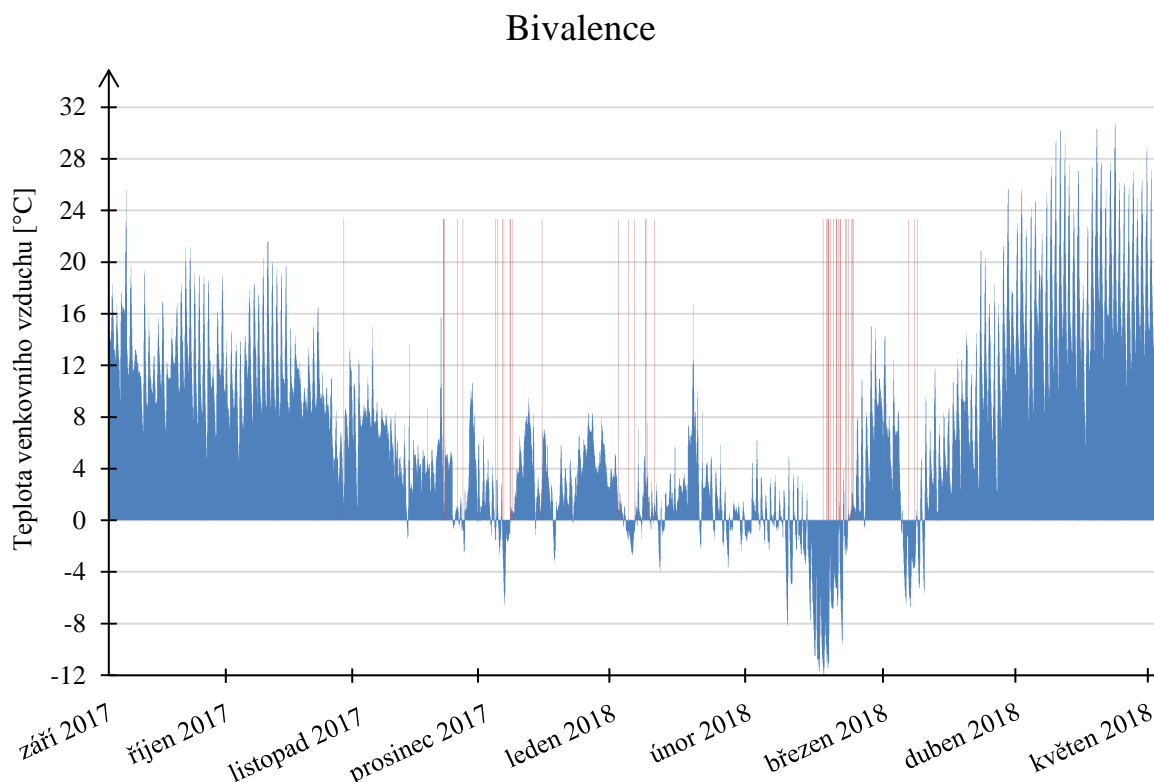
Z grafu vyplývá, že při nižších teplotách venkovního vzduchu se nádrž, z důvodu větší potřeby vytápění objektu, více vybíjí a teplota vody v ní klesá z nastavených 45 °C až k hodnotám blízkým se 30 °C. Topným okruhem pak cirkuluje voda o tak nízké teplotě, že již nezvládá budovu dostatečně vytápet, jelikož teplotní rozdíl mezi teplotou topné vody a teplotou v domě je příliš malý.

Řešením by bylo pořízení akumulční nádrže o větším objemu, jež by se vybíjela pomaleji a teplota vody v ní by nedosahovala tak nízkých hodnot. V radiátorech by pak vždy cirkulovala topná voda o dostatečné teplotě k zajištění tepelné pohody v domě.

5.9 Bivalence

Bivalentním zdrojem jsou tři elektrické topné patrony (označené jako bivalence 1, bivalence 2 a bivalence 3), každá o výkonu 4,5 kW, jež jsou uloženy v dolní části nádrže, viz schéma na obr. 5.2. Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.2.2, bivalentní zdroj je zapojován v případě, kdy tepelné čerpadlo v důsledku velmi nízké teploty venkovního vzduchu nezvládá samostatně pokrýt spotřebu tepla na vytápění.

Na obr. 5.15 je graficky znázorněn (modře) průběh teplot venkovního vzduchu v topné sezóně 2017/2018. Červeně jsou v grafu vyznačeny časové okamžiky, v nichž se spustila bivalence. Je nutné zmínit, že kromě jediného dvouminutového časového úseku 3. března 2018 v 1:52, kdy byla současně spuštěna i bivalence 2, pokryla potřebný chybějící výkon bivalence 1 (stačil výkon pouze jedné elektrické topné patrony). Bivalence 3 nebyla během vyhodnocovaného období spuštěna ani jednou, takže plný výkon bivalentního zdroje (13,5 kW) nebyl za celou topnou sezónu 2017/2018 využit.



Obr. 5.15 Připojování bivalentního zdroje v průběhu topné sezóny

Z grafu je patrné, že bivalence se spouštěla při nejnižších teplotách venkovního vzduchu nacházejících se obvykle pod bodem mrazu.

Jak již bylo zmiňováno v kapitole 5.1, tepelné čerpadlo bylo výkonově navrženo pro vytápění celého domu. Lze tedy říci, že v topné sezóně 2017/2018 bylo ve skutečnosti předimenzované, jelikož se používalo k vytápění pouze jednoho ze dvou bytů. Z této skutečnosti vyplývá i relativně malý počet provozních hodin tepelného čerpadla (spočítaný jako suma všech časových úseků, v nichž běžel kompresor), který byl 1111,3 hodin. Výhodou je delší životnost zařízení a také fakt, že tepelné čerpadlo je schopno překlenout studené dny bez bivalence, což se potvrdilo, jelikož bivalence byla v provozu za celou topnou sezónu pouze 5,7 hodin (suma všech časových úseků, v nichž byla v provozu bivalence 1).

6 OPTIMALIZACE ŘÍZENÍ TEPELNÉHO ČERPADLA

Následující kapitola se zabývá návrhem optimalizace řízení doby běhu kompresoru, která by vedla ke zvýšení efektivity provozu tepelného čerpadla.

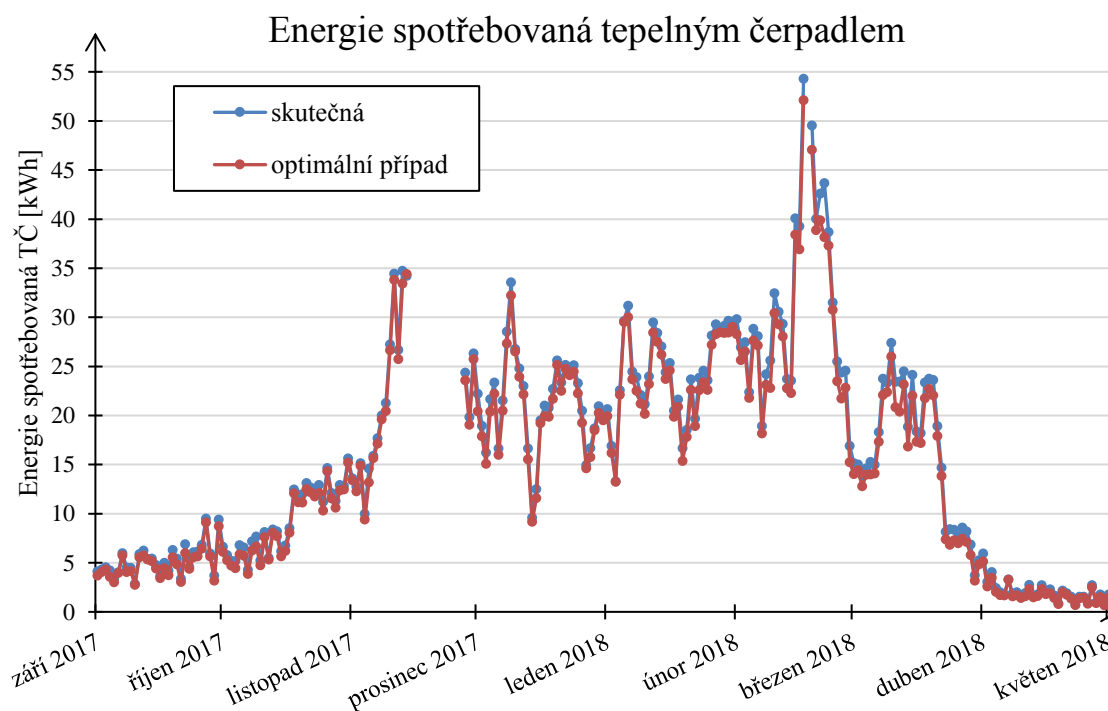
Základní myšlenkou je regulace doby běhu kompresoru na základě aktuální teploty venkovního vzduchu. Podle předpovědi počasí by byly předem známy časy, při nichž by v daný den dosahovala teplota venkovního vzduchu nejvyšších hodnot. Tepelné čerpadlo by pak získávalo teplo ze vzduchu pouze ve chvílích nejvyšší venkovní teploty v daném dni a pracovalo by tak s vyšším topným faktorem. Zkrátí by se čas, v němž musí být tepelné čerpadlo v provozu (kratší doba běhu kompresoru), což by vedlo k úsporám energie, jelikož TČ by mělo menší spotřebu.

6.1 Výpočet optimální spotřeby energie tepelného čerpadla

Na základě návrhu (z úvodu kapitoly 6) bylo pro analyzovanou topnou sezónu 2017/2018 spočítáno minimální množství energie spotřebované tepelným čerpadlem, kterého by mohlo být v optimálním případě dosaženo.

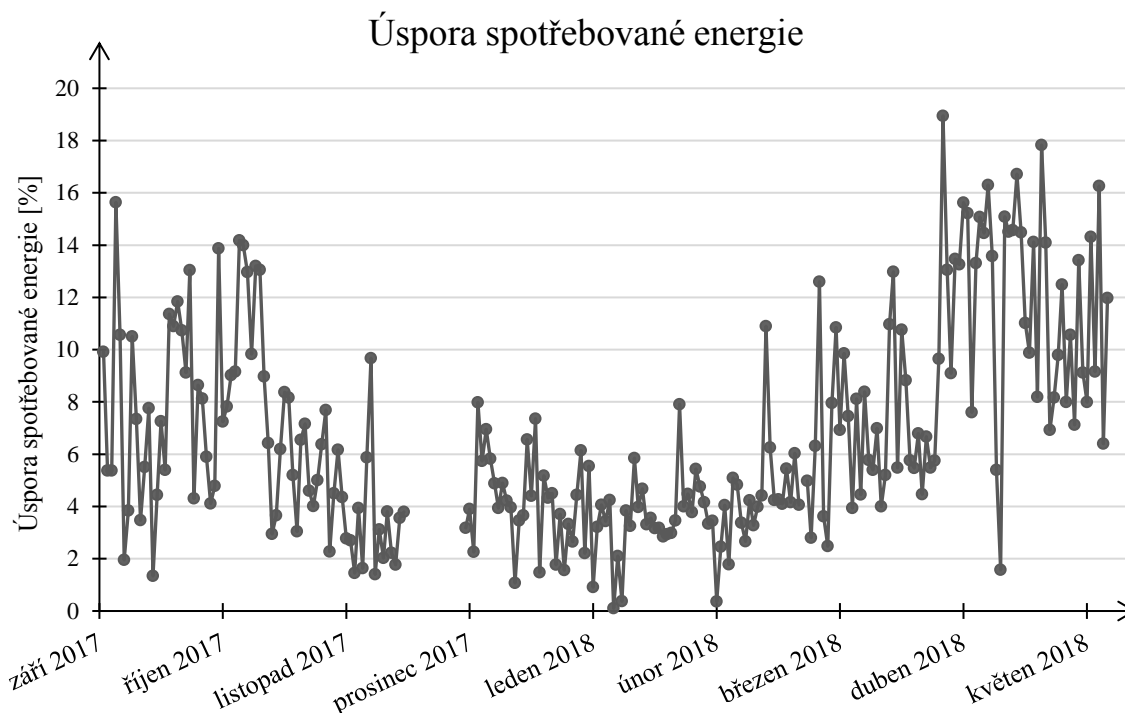
V každém dni byly seřazeny jednotlivé (dvouminutové) časové úseky podle teploty venkovního vzduchu od nejvyšší po nejnižší, přičemž ke každému časovému intervalu náleží i jemu odpovídající teplo dodané tepelným čerpadlem a množství spotřebované energie. Jednotlivá, podle venkovní teploty seřazená, dodaná tepla byla postupně sčítána, dokud se nedosáhlo hodnoty tepla, které bylo ve skutečnosti v daném dni potřeba dodat. (Potřebné množství tepla dodaného tepelným čerpadlem je pro každý den známo.) Sečtením délek jednotlivých, pro dodané teplo vybraných, časových úseků se pro každý den získala potřebná doba běhu kompresoru. Obdobně byla spočítána i celková denní spotřeba energie, jako suma spotřeb ve vybraných časových úsecích.

Graf na obr. 6.1 znázorňuje porovnání energií spotřebovaných tepelným čerpadlem, přičemž modrá barva odpovídá skutečnému množství spotřebované energie a červená barva spotřebě spočítané pro optimální případ.



Obr. 6.1 Porovnání skutečné spotřeby tepelného čerpadla se spotřebou v optimálním případě

Z grafu (obr. 6.1) je zřejmé, že v optimálním případě je množství energie spotřebované tepelným čerpadlem v jednotlivých dnech vždy menší, než bylo ve skutečnosti. Velikost úspor takto dosažených v jednotlivých dnech je vynesena v grafu na obr. 6.2.



Obr. 6.2 Velikost úspor energie spotřebované tepelným čerpadlem

Z grafu (obr. 6.2) je patrné, že v období nejchladnějších měsíců (listopad, prosinec, leden, únor) jsou dosažené úspory nižší. Lze se domnívat, že tato skutečnost je způsobena nutností delší denní provozní doby tepelného čerpadla, a tudíž menší možností vybírat v průběhu dne okamžiky s vyšší teplotou venkovního vzduchu. Dalším důvodem pak může být fakt, že v zimních měsících je menší denní rozdíl venkovní teploty, viz příloha. Průměrná úspora za celou topnou sezónu 2017/2018 činí pro navrženou optimalizaci 4,9 %.

V tabulce 6.1 jsou uvedeny sumární měsíční hodnoty sledovaných parametrů (dodané teplo, doba běhu kompresoru, spotřeba energie), a dále pak průměrná teplota venkovního vzduchu a průměrná úspora získaná optimalizací.

Tab. 6.1 Měsíční hodnoty sledovaných parametrů⁶

| Měsíc | Venkovní teplota [°C] | Teplo dodané TČ [kWh] | Běh kompresoru [h] | | Energie spotřebovaná TČ [kWh] | | Průměrná úspora [%] |
|----------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------|-------------------------------|-----------|---------------------|
| | | | skutečný | optimální | skutečná | optimální | |
| Říjen | 10,66 | 786,60 | 65,52 | 59,31 | 224,05 | 206,83 | 7,51 |
| Listopad | 5,69 | 1776,71 | 160,07 | 153,28 | 533,55 | 516,15 | 3,55 |
| Prosinec | 2,24 | 2098,52 | 205,14 | 194,52 | 671,00 | 642,83 | 4,15 |
| Leden | 2,57 | 2193,32 | 212,26 | 203,36 | 696,08 | 672,17 | 3,4 |
| Únor | -1,07 | 2349,59 | 249,48 | 236,50 | 800,17 | 766,09 | 4,23 |
| Březen | 2,84 | 2336,67 | 233,26 | 213,90 | 759,67 | 708,59 | 6,6 |
| Duben | 15,08 | 463,77 | 37,07 | 31,36 | 127,81 | 112,54 | 11,69 |

⁶ Hodnoty dnů, pro něž nebyly k dispozici údaje (viz kap. 5.3), byly v měsíčních sumách nahrazeny průměrnými denními hodnotami pro daný měsíc. V tabulce nejsou uvedeny měsíce září a květen, jelikož v první půlce září a v druhé půlce května nebylo třeba vytápět (nejsou k dispozici data).

V tabulce 6.1 jsou porovnány skutečné hodnoty doby běhu kompresoru a množství energie spotřebované tepelným čerpadlem s hodnotami získanými pro optimální případ. Z tabulky je zřejmé, že v optimálním případě jsou potřebná doba běhu kompresoru a spotřeba energie ve všech měsících menší.

6.2 Výpočet objemu akumulční nádrže

Následující kapitola se zabývá výpočtem objemu akumulční nádrže, která by postačovala k uložení tepla dodaného tepelným čerpadlem v období nejvyšších denních teplot. Objem akumulátoru musí být dostatečně velký, aby zvládl překlenout části dne, kdy je teplota venkovního vzduchu nízká. Obecně lze říci, že nejvyšších denních teplot vzduchu je dosahováno během poledne a odpoledne, naopak nejnižších teplot v noci a nad ránem. Právě při nízkých nočních teplotách by bylo k vytápění využíváno teplo naakumulované během dne.

Pro výpočet objemu akumulátoru bylo nejprve pomocí vztahu 6.1 vyčísleno množství tepla, které musí být akumulátor schopen v daném dni uchovat.

$$Q_{aku} = \frac{Q_{den}}{24} (24 - t_{komp}) \quad (6.1)$$

kde:

Q_{den} – teplo dodané tepelným čerpadlem v daném dni [kWh]

t_{komp} – doba běhu kompresoru v daném dni (pro optimální případ) [h]

Na základě množství tepla uchovaného v akumulátoru byl pomocí vztahu 6.2 určen pro každý den potřebný objem akumulční nádrže.

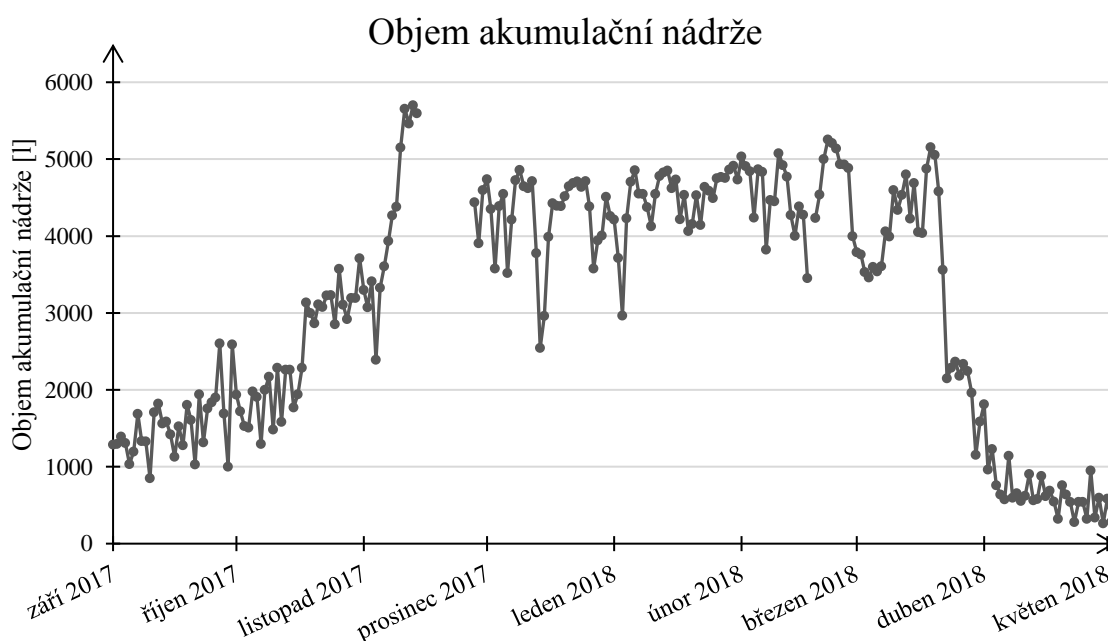
$$V_{aku} = \frac{Q_{aku}}{\rho c \Delta T_{aku}} \quad (6.2)$$

kde:

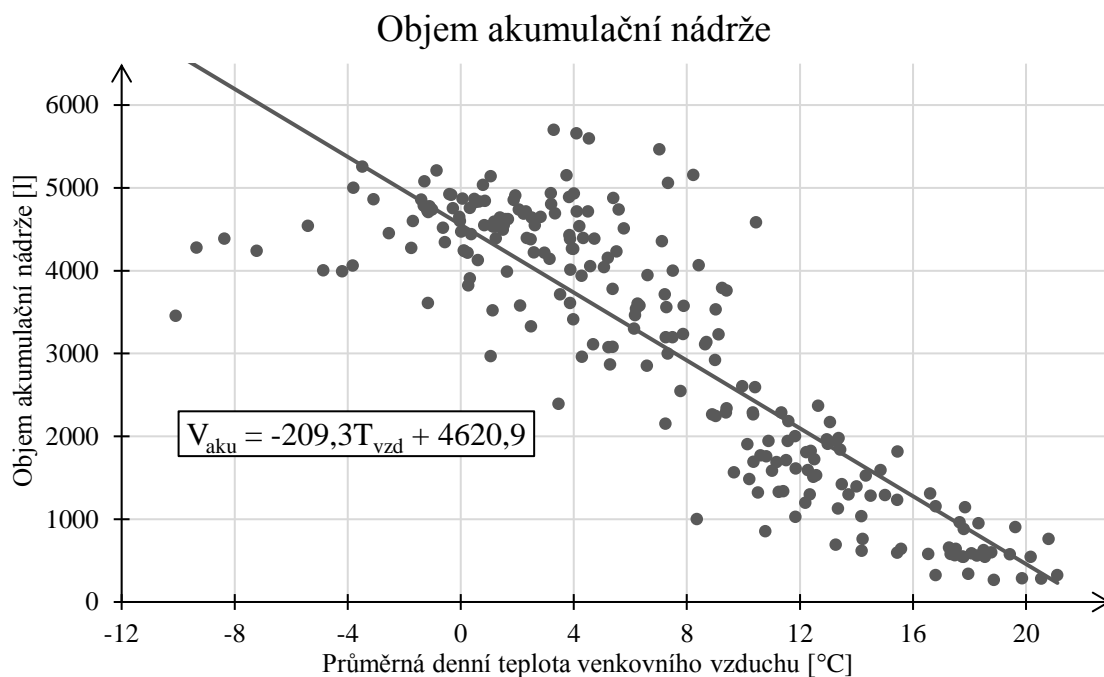
ρ – hustota vody; počítáno s $\rho = 992 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (odpovídá teplotě vody 40°C)

c – měrná tepelná kapacita vody; počítáno s $c = 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

ΔT_{aku} – rozdíl teplot vody v akumulátoru; po dohodě s vedoucím práce stanoveno $\Delta T_{aku} = 10^\circ \text{C}$



Obr. 6.3 Potřebný objem akumulční nádrže v jednotlivých dnech



Obr. 6.4 Objem akumulční nádrže v závislosti na průměrné denní teplotě vzduchu

Z grafů na obr. 6.3 a 6.4 vyplývá, že při nižších teplotách venkovního vzduchu (v chladnějších měsících) je potřeba akumulční nádrž o větším objemu. Lze tedy říci, že čím nižší venkovní teplota, tím větší množství tepla je nutné uchovávat.

Z obr. 6.3 je dále možné vyčíst, že pro uchování potřebného množství tepla k překlenutí časů, kdy jsou během dne nižší teploty, by měla být dostatečná akumulční nádrž o objemu 5000 litrů. Pořízení takto velké akumulční nádrže je však finančně náročné. Například cena akumulční nádrže Fénix o objemu 5000 litrů s vloženou nerezovou spirálou pro ohřev TUV a jedním výměníkem (viz obr. 6.5) je 71 620 Kč. [68]



Obr. 6.5 Akumulční nádrž s ohřevem TUV – MT1 5000 l + DN32 [68]

6.3 Ekonomické zhodnocení

Návrh optimalizace řízení tepelného čerpadla je v následující kapitole zhodnocen i po stránce ekonomické výhodnosti. Za tímto účelem bylo nejprve nutné vyčíslit celkové množství energie spotřebované tepelným čerpadlem za topnou sezónu 2017/2018⁷, přičemž skutečná spotřeba činí 3925,6 kWh, po optimalizaci je spotřeba rovna 3729,31 kWh.

Cena elektrické energie v nízkém tarifu byla v daném období a v daném místě spotřeby dle vyúčtování společnosti E.ON rovna 2,11 Kč/kWh, stálý měsíční poplatek pak činil 326,39 Kč. Jelikož je měsíční poplatek placen za spotřebu celé domácnosti, byla k vyčíslení výdajů na provoz tepelného čerpadla po dohodě s vedoucím práce připočítávána měsíčně pouze polovina poplatku. Skutečné výdaje na spotřebu elektrické energie tepelným čerpadlem za topnou sezónu 2017/2018 tak i s měsíčním poplatkem činily 9602,62 Kč, výdaje na spotřebu při použití optimalizačního návrhu by byly 9188,44 Kč. Celková finanční úspora by tedy v topné sezóně 2017/2018 byla rovna 414,18 Kč. (Je důležité zmínit, že všechny uvedené údaje jsou bez započítání DPH.)

Jak již z výše uvedeného vyplývá, návrh optimalizace řízení tepelného čerpadla není vzhledem k malé finanční úspoře, nutnosti pořízení nákladné akumulární nádrže (viz kap. 6.4) a potřebě složité regulace z ekonomického hlediska výhodný.

⁷ Hodnoty dnů, pro něž nebyly k dispozici údaje (viz kap. 5.3), byly nahrazeny průměrnými denními hodnotami pro daný měsíc.

7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala tématem využití nízkopotenciálního tepla okolního prostředí prostřednictvím tepelných čerpadel, a především pak vyhodnocením provozních dat tepelného čerpadla vzduch/voda využívaného k ohřevu topné a užitkové vody v rodinném domě.

První kapitola teoretické části práce byla věnována charakteristice tepelných čerpadel jako takových. Součástí této kapitoly je popis historického vývoje zakončený současným stavem využívání tepelných čerpadel, dále jsou zde zmíněny jednotlivé typy tepelných čerpadel, přičemž pozornost je zaměřena především na, v současné době nejrozšířenější, kompresorová tepelná čerpadla. Podrobněji jsou rozebrány jednotlivé komponenty (výparník, kompresor, kondenzátor a expanzní ventil) a používaná chladiva. Závěr kapitoly se zabývá hodnocením efektivity a kvality tepelných čerpadel, zejména určením jmenovitého a sezónního topného faktoru.

Následující kapitola obsahuje přehled jednotlivých zdrojů nízkopotenciálního tepla a uvádí výhody a nevýhody jejich použití v praxi. Nejčastěji využívaným zdrojem je pro svou dostupnost a jednoduchou instalaci zařízení atmosférický vzduch. Jeho hlavní nevýhodou je však, na rozdíl od získávání tepla z půdy či vody, horší topný faktor v zimním období, a s tím související potřeba přídatného zdroje tepla. Stabilní výkon a vyšší topný faktor při využití nízkopotenciálního tepla z půdy či vody je vykoupen vyššími pořizovacími náklady z důvodu složitých technických prací při realizaci vrtů a instalaci kolektorů.

Závěrečná kapitola teoretické části diplomové práce pojednává o vlastnostech topných soustav, o provezech tepelného čerpadla (monovalentní či bivalentní, jenž využívá doplňkový zdroj tepla) a o způsobech akumulace tepelné energie (akumulace citelného a skupenského tepla). Tuto kapitolu sledující spojení mezi soustavou tepelného čerpadla a danou budovou uzavírá oddíl zabývající se podporou instalace nových tepelných čerpadel prostřednictvím dotací a zvýhodněné dvoutarifové sazby elektrické energie.

Těžiště práce tvoří praktická část, jejíž součástí je především zpracování a vyhodnocení provozních dat z konkrétní instalace tepelného čerpadla. Podrobná data o provozu tepelného čerpadla pro topnou sezónu 2017/2018 byla poskytnuta výrobcem TC MACH, přičemž snímání těchto dat probíhalo ve dvouminutových intervalech. Analýza sestávala z výpočtu denní doby běhu kompresoru potřebného pro určení množství elektrické energie spotřebované tepelným čerpadlem v jednotlivých dnech, dále byl spočítán topný faktor *COP*, který se následně společně se spotřebou tepelného čerpadla použil ke stanovení množství tepla dodaného tepelným čerpadlem. Všechny tyto hodnoty byly společně s průběhem průměrných denních teplot venkovního vzduchu vyneseny do grafů, z nichž vyplývá, že se snižující se venkovní teplotou roste spotřeba elektrické energie a množství tepla dodávaného tepelným čerpadlem, zatímco topný faktor klesá. Hodnota sezónního topného faktoru byla vyčíslena na 3,2.

Posuzováno bylo též kolísání teploty vody v akumulační nádrži, přičemž se ukázalo, že při nízkých venkovních teplotách se nádrž vybíjí až k hodnotám nedostačujícím pro vytápění objektu. Rychlé vybíjení nádrže je způsobeno jejím menším objemem. Bivalentní zdroj, který je součástí akumulátoru, byl za celou topnou sezónu v provozu pouze 5,7 hodin, což potvrzuje, že tepelné čerpadlo lze vzhledem k jeho využívání považovat za předimenzované.

Závěr praktické části byl věnován návrhu optimalizace řízení doby běhu tepelného čerpadla na základě teploty venkovního vzduchu za účelem snížení spotřeby elektrické energie. Finanční úspora je však v tomto případě nevýznamná ve srovnání s ostatními náklady.

Během analýzy provozních dat byl potvrzen nezanedbatelný přínos akumulační nádrže, díky které bylo možno překlenout období vysokého tarifu. Pro snížení kolísání teploty v nádrži a zajištění tepelného komfortu v domě lze však doporučit pořízení akumulační nádrže o větším objemu, jenž by zamezil rychlému vybíjení.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Encyklopedie energetiky, Energie ze všech stran. *Skupina ČEZ* [online]. Copyright © 2011, ČEZ, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/pro-media-2014/05-kveten/encyklopedie_energie-ze-vsech-stran_e.pdf
- [2] GALAS, Otakar a Veronika ŠÍPKOVÁ. *Sborník o tepelných čerpadlech*. Ostrava: Moravskoslezský energetický klastr, 2014. ISBN 978-80-905392-9-7.
- [3] Centrální systémy zásobování teplem nebo tepelná čerpadla?. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/teplarenstvi/11552-centralni-systemy-zasobovani-teplem-nebo-tepelna-cerpadla>
- [4] QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [5] ŽERAVÍK, Antonín. *Stavíme tepelné čerpadlo: [návratnost i za jeden rok]*. Přerov: Antonín Žeravík, 2003. ISBN 80-239-0275-x.
- [6] ZOGG, Martin. *History of Heat Pumps. Swiss Contributions and International Milestones* [online]. Copyright © 2008, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <http://www.zogg-engineering.ch/publi/HistoryHP.pdf>
- [7] Residential Heat Pumps | AirConditioning-and-Heating. *Buying and Repairing HVAC Equipment | AirConditioning-and-Heating* [online]. Copyright © 2019 Paratus Corporation. All rights reserved, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <http://www.airconditioning-and-heating.com/heatpumps-information/>
- [8] MYSLIL, Vlastimil. *Geotermální energie: zdroje, využití, technologie*. Liberec: Geoterm CZ, 2011. ISBN 978-80-260-2349-4.
- [9] Budoucnost tepelných čerpadel v Evropě a v ČR. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/18356-budoucnost-tepelnych-cerpadel-v-evrope-a-v-cr>
- [10] SRDEČNÝ, Karel a Jan TRUXA. *Tepelná čerpadla*. Praha: EkoWATT, 2009. ISBN 978-80-87333-02-0.
- [11] Funkce TČ - Teplotechnika, Tepelná čerpadla. *Tepelná čerpadla - Teplotechnika, s.r.o.* [online]. Copyright © 2011, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <http://teplotechnika.cz/funkce-tepelneho-cerpadla>
- [12] ŠKORPÍK, Jiří. Tepelné oběhy a jejich realizace, *Transformační technologie*, 2006-11, [last updated 2019-04-21]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/06.html>.
- [13] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 9788021443006.
- [14] PETRÁŠ, Dušan. *Nízkoteplotní vytápění a obnovitelné zdroje energie*. Bratislava: Jaga, 2008. Vytápění. ISBN 978-80-8076-069-4.

- [15] Tepelná čerpadla. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla>
- [16] Výměníky tepla. *Aplikovaná termomechanika* [online]. Copyright © 2011, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra technických zařízení budov, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/files/vyuka/125yatm/prednasky/125yatm-06.pdf>
- [17] Porovnání charakteristik výměníků tepla. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/klimatizace-a-chlazení/8414-porovnani-charakteristik-vymeniku-tepla>
- [18] KUPPAN, Thulukkanam. *Heat exchanger design handbook*. USA, New York: Taylor and Francis, 2000. ISBN 0-8247-9787-6.
- [19] Lamelové výměníky - CIAT. *Tepelné čerpadlo od společnosti CIAT* [online]. Copyright © 2019, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <http://www.ciat.cz/vymeniky-tepla/lamelove-vymeniky>
- [20] Kompresory pro tepelná čerpadla. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/13498-kompresory-pro-tepelna-cerpadla>
- [21] FAQ of the acr chiller rent GmbH out of the area of refrigeration technology. *acr chiller rent: Mietkälte, mobile Kälte, Flüssigkeitskühler, Industriekälte mieten und gebraucht kaufen* [online]. Copyright © 2012, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: https://www.ac-rent.de/english/company_faq_refrigeration.html
- [22] KARTOUS, Petr. *Není EVI jako EVI* [online]. NIBE, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: https://www.nibe.cz/images/download/publicita/Nen%C3%AD_Evi_jako_Evi.pdf
- [23] Technologie EVI - kvalita pro Vaše tepelné čerpadlo!. Kuzďas, expert na topení [online]. Copyright © 2014-2019, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <http://www.tepelna-cerpadla-vzduch.cz/novinky/2015-01-19-technologie-evi-kvalita-pro-vase-tepelne-cerpadlo/>
- [24] Pravidla údržby tepelných čerpadel. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/3099-pravidla-udrzby-tepelnych-cerpadel>
- [25] Deskové výměníky tepla SWEP. Deskové výměníky tepla SWEP [online]. Copyright © 2013, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <http://www.vymenik.com/>
- [26] Dvouplášťový deskový výměník OVBDD 62, 62 kW. *Bazény obklady mozaika* [online]. [Cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.bazeny-obklady-mozaika.cz/deskove-a-keramicke-vymeniky/1114-dvouplastovy-deskovy-vymenik-ovbdd-62-62-kw.html>
- [27] Expanze chladiva v klimatizaci a chlazení: proč elektronický expanzní ventil? [online]. Copyright © 2005, CAREL, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/4702641-Expanze-chladiva-v-klimatizaci-a-chlazení-proc-elektronicky-expanzni-ventil.html>
- [28] Elektronické expanzní ventily - ExV. *CAREL* [online]. [Cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.carel.cz/electronic-expansion-valve>
- [29] Chladiva používaná v tepelných čerpadlech. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/12647-chladiva-pouzivana-v-tepelnych-cerpadlech>

- [30] Chladiva – úvod, definice, historie. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/klimatizace-a-chlazení/13626-chladiva-uvod-definice-historie>
- [31] Tepelná čerpadla a kontroly těsnosti od 1. ledna 2017. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/14986-tepelna-cerpadla-a-kontroly-tesnosti-od-1-ledna-2017>
- [32] DVORSKÝ, Emil a HEJTMÁNKOVÁ, Pavla. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 8073001187.
- [33] Systémy společné výroby elektrické energie, tepla a chladu. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/6519-systemy-spolecne-vyroby-elektricke-energie-tepla-a-chladu>
- [34] Parametry pro hodnocení efektivity tepelných čerpadel: COP a SCOP. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/13196-parametry-pro-hodnoceni-efektivita-tepelnych-cerpadel-cop-a-scop>
- [35] Topný faktor COP - účinnost tepelného čerpadla. *Abeceda tepelných čerpadel* [online]. [Cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.abeceda-cerpadel.cz/cz/topny-faktor-cop-ucinnost-tepelneho-cerpadla>
- [36] Hodnocení SCOP tepelných čerpadel pro vytápění. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/13507-hodnoceni-scop-tepelnych-cerpadel-pro-vytapani>
- [37] ErP Directive - Toshiba Klima [online]. Copyright © 2019 AIR-COND Klimaanlagen-Handelsgesellschaft m.b.H. All Rights Reserved, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.toshiba-klima.at/en/erp-directive.html>
- [38] Značka kvality pro tepelná čerpadla [online]. 2011. Praha: Národní komise pro přidělování značky kvality pro tepelná čerpadla AVTČ, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: www.avtc.cz/?download=_/94/clanek-na-tzb-q.pdf
- [39] Značka kvality Q: AVTČ. *AVTČ: Asociace pro využití tepelných čerpadel* [online]. Copyright © 2008, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <http://www.avtc.cz/?page=znacka-kvality-q>
- [40] Quality of product and installation - EHPA. *EHPA* [online]. [Cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.ehpa.org/quality/>
- [41] CHARVÁTOVÁ, Marie. *Akumulace energie z obnovitelných zdrojů*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jan Fišer.
- [42] DŘÍMAL, Petr. *Tepelná čerpadla, geotermální energie* [online]. Copyright © 2016, ISBN 978-80-88058-05-2, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/93/02.html>
- [43] MACH, Stanislav a PATOČKA, Martin. Projekční podklady MACH CHAMELEON AKU [online]. Copyright © 2014, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/3190713-Projekcni-podklady-mach-chameleon-aku.html>

- [44] Podnebí Moravských Karpat. *Moravské Karpaty* [online]. [Cit. 11.04.2019]. Dostupné z: <http://moravske-karpaty.cz/prirodni-pomery/klima/podnebi-moravskych-karpat/>
- [45] Reportáž ze Semil, které v referendu rozhodovaly o geotermální elektrárně - Aktuálně.cz. *Zprávy - Aktuálně.cz* [online]. 2013, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/domaci/geotermalni-elektrarna-v-semilech-referendum/r~i:gallery:30236/r~i:photo:540437/>
- [46] Výpočet délky zemních sond pro tepelná čerpadla | TOPIN. *TOPIN - Topenářství instalace* [online]. Copyright © 2019, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <http://www.topin.cz/clanky/vypocet-delky-zemnich-sond-pro-tepelna-cerpadla-detail-3681>
- [47] Tepelné čerpadlo země/voda princip. *Abeceda tepelných čerpadel* [online]. [Cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.abeceda-cerpadel.cz/cz/tepelne-cerpadlo-zeme-voda>
- [48] Tepelná pohoda a nepohoda. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/404-tepelna-pohoda-a-nepohoda>
- [49] Dvě třetiny energie spotřebované českými domácnostmi připadají na vytápění. *OEnergetice.cz* [online]. 2017, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/teplarenstvi/dve-tretiny-energie-spotrebovane-ceskymi-domacnostmi-pripada-na-vytapeni>
- [50] KARAFIÁT, Josef. *Sborník technických řešení zdrojů s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla* [online]. Praha, 2016, ORTEP, s.r.o., [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>
- [51] Dimenzování tepelného čerpadla vzduch-voda, bivalentní/záložní zdroj. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepeln-cerpadla/7995-dimenzovani-tepelneho-cerpadla-vzduch-voda-bivalentni-zalozni-zdroj>
- [52] Ekvitermní regulace – princip a využití v systémech regulace vytápění. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/6294-ekvitermni-regulace-princip-a-vyuziti-v-systemech-regulace-vytapeni>
- [53] Využívání a provozování tepelných čerpadel v nízkoenergetických domech. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepeln-cerpadla/12211-vyuzivani-a-provozovani-tepelnych-cerpadel-v-nizkoenergetickych-domech>
- [54] Akumulace tepelné energie - fyzikální principy. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-tepla/1482-akumulace-tepelne-energie-fyzikalni-principy>
- [55] Význam akumulační nádoby u tepelného čerpadla. *Tepelná čerpadla PZP - Spolehlivá tepelná čerpadla českého výrobce* [online]. Copyright © 2019, Tepelná čerpadla PZP, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.tepelna-cerpadla-pzp.cz/cs/vyznam-akumulacni-nadoby-u-tepelneho-cerpadla-296.html>
- [56] MATUŠKA, Tomáš. *Solární tepelné soustavy*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2009. Sešit projektanta - pracovní podklady. ISBN 978-80-02-02186-5.

- [57] Solární zásobníky. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/137-solarni-zasobniky>
- [58] Zásobníky tepla. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/1950-zasobniky-tepla>
- [59] PCM ve stavebnictví Díl 1: Základní charakteristiky PCM. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/7360-pcm-ve-stavebnictvi-dil-1-zakladni-charakteristiky-pcm>
- [60] O programu – Nová zelená úsporám. *Nová zelená úsporám – Dotace pro úsporné bydlení* [online]. Copyright © 2019, Státní fond životního prostředí ČR, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.novazelenausporam.cz/o-programu/>
- [61] Rodinné domy – zdroje energie – Nová zelená úsporám. *Nová zelená úsporám – Dotace pro úsporné bydlení* [online]. Copyright © 2019, Státní fond životního prostředí ČR, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.novazelenausporam.cz/nabidka-dotaci/rodinne-domy-zdroje-energie/>
- [62] Kotlíková dotace 2015-2020: podmínky a podrobnosti. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotlikove-dotace/12985-kotlikova-dotace-2015-2020-podminky-a-podrobnosti#co-jsou-kd>
- [63] Kotlíkové dotace – 3. výzva – SFŽP ČR. *SFŽP ČR – Státní fond životního prostředí ČR* [online]. Copyright © 2019, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.sfzp.cz/dotace-a-pujcky/kotlikove-dotace/kotlikove-dotace-3-vyzva/>
- [64] Elektřina: druhy sazeb a tarifu | Přehled dodavatelů elektrické energie a zemního plynu. *Dodavatelektriny.cz - O energiích jasně a srozumitelně* [online]. [Cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://dodavatelektriny.cz/uzitecne-informace/sazby-tarify>
- [65] Distribuční sazba pro tepelné čerpadlo. *Tepelná čerpadla PZP - Spolehlivá tepelná čerpadla českého výrobce* [online]. Copyright © 2019, Tepelná čerpadla PZP, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.tepelna-cerpadla-pzp.cz/cs/distribucni-sazba-pro-tepelne-cerpadlo-196.html>
- [66] Přehled cen elektrické energie. *TZB-info* [online]. Copyright © 2001-2019, Topinfo s.r.o., všechna práva vyhrazena, ISSN 1801-4399, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energii/14-prehled-cen-elektricke-energie>
- [67] Tepelná čerpadla k bazénu, tepelné čerpadlo pro saunu | TC MACH. *Česká tepelná čerpadla Brno - výroba tepelných čerpadel | TC MACH* [online]. [Cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <http://www.tepelna-cerpadla-mach.cz/tepelna-cerpadla-pro-rodinne-domy/rodinne-domy-s-pozadavkem-na-rizeni-ohrevu.php>
- [68] Akumulační nádrž s ohřevem TUV - MT1 5000l +DN32 | AkuNádrže.cz. *Akumulační nádrže, kotle na tuhá paliva* [online]. Copyright © 2013, [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.akunadrze.cz/akumulacni-nadrz-s-ohrevem-tuv-mt1-5000l-dn32-i256/>
- [69] Portál ČHMÚ: Historická data: Počasí: Měsíční data. *Portál ČHMÚ: Home* [online]. [Cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mesicni-data?fbclid=IwAR1Fe2RdeDR5QHhA75fmtePDQipXUTwTXSoz61hhN5APxbRwou9sZNGICJ0>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

| Seznam použitých zkratek | |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Zkratka | Význam |
| A | Air (vzduch) |
| AO | Absorpční oběh |
| AVTČ | Asociace pro využití tepelných čerpadel |
| CFC | Chlorofluorocarbon (plně halogenované uhlovodíky) |
| COP | Coefficient of performance (topný faktor) |
| ČHMÚ | Český hydrometeorologický ústav |
| ČR | Česká republika |
| EEV | Elektronický expanzní ventil |
| EHPA | European heat pump association (Evropská asociace tepelných čerpadel) |
| EV | Expanzní ventil |
| EVI | Enhanced vapour injection (vstřík par) |
| GWP | Global warming potential (potenciál globálního oteplování) |
| HCFC | Hydrochlorofluorocarbon (částečně halogenované uhlovodíky) |
| HFC | Hydrofluorocarbon (fluorované uhlovodíky) |
| HFO | Hydrofluoro-olefiny |
| KK | Kuchyňský kout |
| NT | Nízký tarif |
| ODP | Ozone depletion potential (potenciál poškozování ozonové vrstvy) |
| PCM | Phase change materials (materiály s látkovou přeměnou) |
| SCOP | Seasonal coefficient of performance (sezónní topný faktor) |
| TČ | Tepelné čerpadlo |
| TEV | Termostatický expanzní ventil |
| TUV | Teplá užitková voda |
| ÚNMZ | Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví |
| VT | Vysoký tarif |
| W | Water (voda) |

| Seznam použitých veličin | | |
|--------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Veličina | Jednotka | Význam |
| c | $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ | Měrná tepelná kapacita |
| COP | $[-]$ | Topný faktor |
| E | $[\text{kWh}]$ | Energie spotřebovaná v domácnosti |
| $P_{\text{TČ}}$ | $[\text{kW}]$ | Elektrický příkon tepelného čerpadla |
| Q_{aku} | $[\text{kWh}]$ | Teplo uchované v akumulátoru |
| Q_{den} | $[\text{kWh}]$ | Teplo dodané tepelným čerpadlem za den |
| SCOP | $[-]$ | Sezónní topný faktor |
| t_{komp} | $[\text{h}]$ | Doba běhu kompresoru |
| T_{aku} | $[\text{°C}]$ | Teplota v akumulární nádrži |
| T_{TUV} | $[\text{°C}]$ | Teplota TUV na výstupu z akumulární nádrže |
| $T_{\text{TV, in}}$ | $[\text{°C}]$ | Teplota topné vody na vstupu do kondenzátoru |
| $T_{\text{TV, out}}$ | $[\text{°C}]$ | Teplota topné vody na výstupu z kondenzátoru |
| T_{vzd} | $[\text{°C}]$ | Teplota venkovního vzduchu |
| $\Delta T_{\text{W-A}}$ | $[\text{°C}]$ | Rozdíl teplot voda-vzduch |
| V_{aku} | $[\text{l}]$ | Objem akumulární nádrže |
| ρ | $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ | Hustota |

SEZNAM OBRÁZKŮ

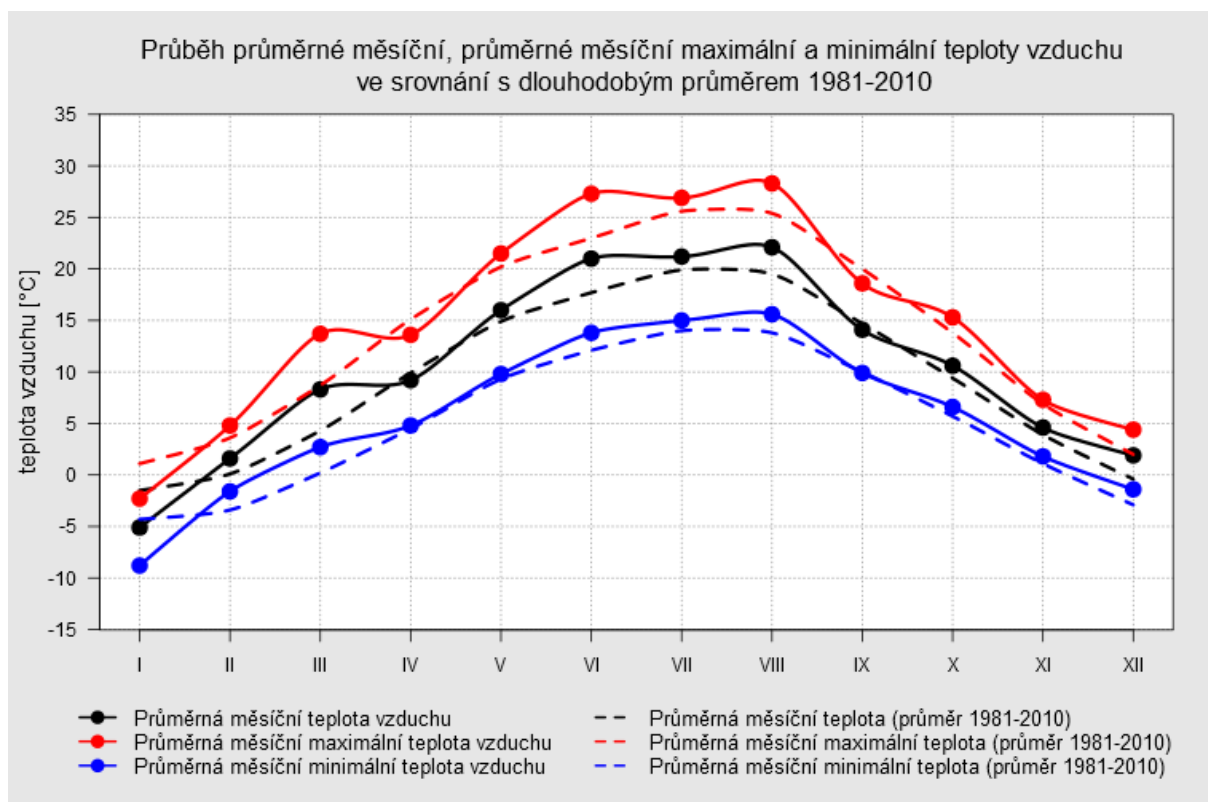
| | | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 2.1 | William Thomson (lord Kelvin) | 18 |
| Obr. 2.2 | Pístové kompresory TČ instalovaných r. 1941 pro vytápění curyšského plaveckého bazénu..... | 18 |
| Obr. 2.3 | TČ instalovaná v roce 2016 v evropských státech..... | 18 |
| Obr. 2.4 | Vývoj počtu instalací TČ v ČR..... | 19 |
| Obr. 2.5 | Princip kompresorového tepelného čerpadla..... | 19 |
| Obr. 2.6 | Chladicí oběh v T-s diagramu..... | 20 |
| Obr. 2.7 | Lamelový výměník tepla | 21 |
| Obr. 2.8 | Princip funkce kompresoru scroll | 21 |
| Obr. 2.9 | Deskové výměníky tepla..... | 22 |
| Obr. 2.10 | Elektronický expanzní ventil | 23 |
| Obr. 2.11 | Základní schéma absorpčního oběhu..... | 25 |
| Obr. 2.12 | Klimatické oblasti Evropy | 27 |
| Obr. 2.13 | Značka kvality | 28 |
| Obr. 3.1 | Vzduch jako zdroj energie | 29 |
| Obr. 3.2 | Schéma děleného tepelného čerpadla vzduch/voda (split) | 30 |
| Obr. 3.3 | Průměrná roční teplota vzduchu za období 1981–2010 | 31 |
| Obr. 3.4 | Tepelný tok v České republice | 32 |
| Obr. 3.5 | Rozložení teploty zemního masivu během roku v závislosti na hloubce | 32 |
| Obr. 3.6 | Zemní plošné kolektory | 33 |
| Obr. 3.7 | Vertikální kolektory..... | 34 |
| Obr. 3.8 | Čerpací a vsakovací studna..... | 35 |
| Obr. 3.9 | Kolektor ve stojaté vodě | 36 |
| Obr. 4.1 | Typický měsíční diagram potřeb tepla s rozlišením účelů spotřeby..... | 37 |
| Obr. 4.2 | Ekvitemní křivky | 38 |
| Obr. 4.3 | Spotřeba tepla objektu a teplo dodávané TČ vzduch/voda v závislosti na venkovní teplotě..... | 39 |
| Obr. 4.4 | Porovnání akumulace latentního tepla s akumulací citelného tepla | 41 |
| Obr. 5.1 | Řadový dům v Brně Žabovřeskách..... | 43 |
| Obr. 5.2 | Schéma zapojení tepelného čerpadla | 44 |
| Obr. 5.3 | Venkovní jednotka tepelného čerpadla..... | 45 |
| Obr. 5.4 | Vnitřní jednotka tepelného čerpadla s akumulací nádrží..... | 45 |
| Obr. 5.5 | Grafické znázornění průběhu venkovní teploty a doby běhu kompresoru | 47 |
| Obr. 5.6 | Doba běhu kompresoru za den | 48 |
| Obr. 5.7 | Závislost elektrického příkonu na teplotě venkovního vzduchu | 49 |
| Obr. 5.8 | Energie spotřebovaná tepelným čerpadlem | 49 |
| Obr. 5.9 | Závislost denní spotřeby domácnosti na době běhu kompresoru | 50 |
| Obr. 5.10 | Porovnání variant výpočtu energie spotřebované tepelným čerpadlem | 51 |
| Obr. 5.11 | Závislost topného faktoru na rozdílu teplot voda-vzduch | 51 |
| Obr. 5.12 | Průměrný denní topný faktor | 52 |
| Obr. 5.13 | Množství tepla dodaného tepelným čerpadlem | 53 |
| Obr. 5.14 | Denní maximální rozdíl teplot v akumulací nádrži | 54 |

| | | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 5.15 | Připojování bivalentního zdroje v průběhu topné sezóny | 55 |
| Obr. 6.1 | Porovnání skutečné spotřeby tepelného čerpadla se spotřebou v optimálním případě | 57 |
| Obr. 6.2 | Velikost úspor energie spotřebované tepelným čerpadlem..... | 58 |
| Obr. 6.3 | Potřebný objem akumulční nádrže v jednotlivých dnech | 59 |
| Obr. 6.4 | Objem akumulční nádrže v závislosti na průměrné denní teplotě vzduchu | 60 |
| Obr. 6.5 | Akumulční nádrž s ohřevem TUV – MT1 5000 l + DN32 | 60 |

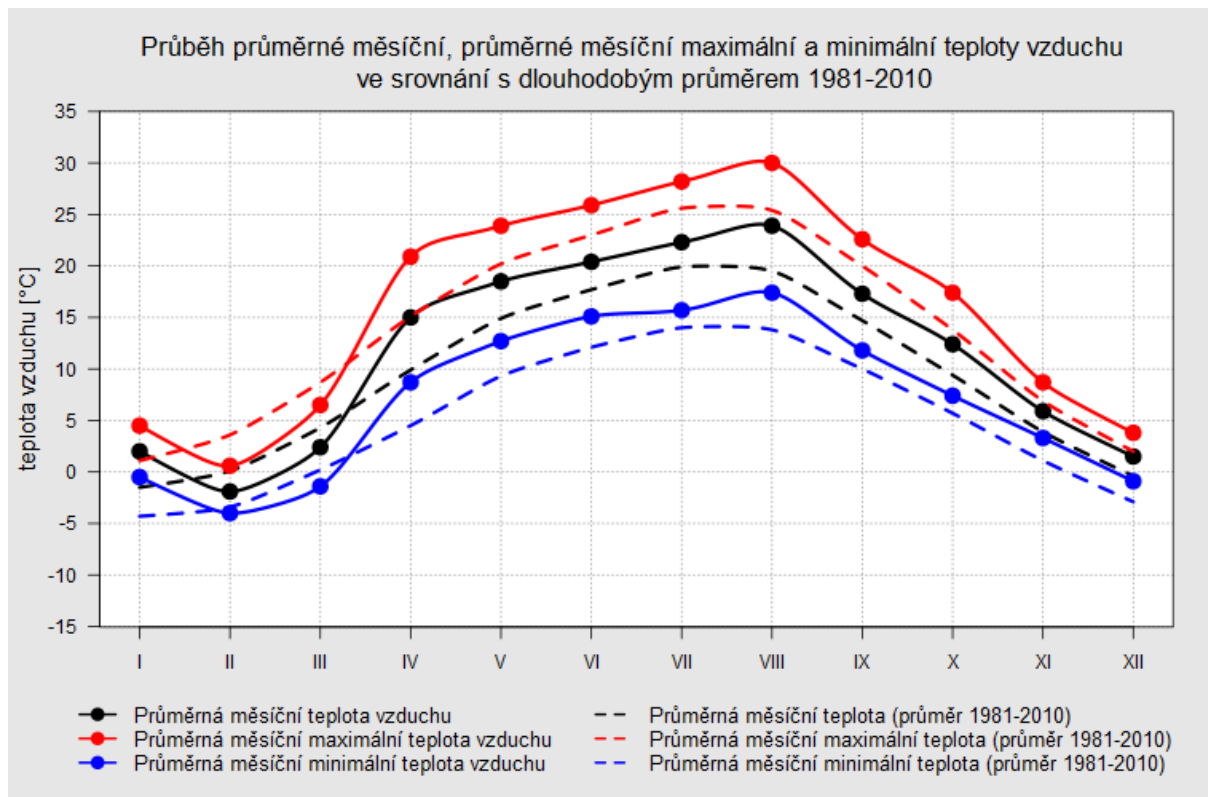
SEZNAM TABULEK

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 2.1 | Nejčastěji používaná chladiva v tepelných čerpadlech | 24 |
| Tab. 2.2 | Minimální topné faktory tepelných čerpadel | 28 |
| Tab. 4.1 | Nová zelená úsporám – dotace na tepelné čerpadlo | 42 |
| Tab. 4.2 | Sazba D 56d – cena elektřiny ve vysokém a nízkém tarifu | 42 |
| Tab. 4.3 | Sazba D 57d – cena elektřiny ve vysokém a nízkém tarifu | 42 |
| Tab. 5.1 | Parametry tepelného čerpadla | 46 |
| Tab. 5.2 | Pásma vysokého tarifu pro jednotlivá období topné sezóny 2017/2018 | 46 |
| Tab. 6.1 | Měsíční hodnoty sledovaných parametrů | 58 |

PŘÍLOHA



Průměrné měsíční teploty vzduchu pro rok 2017, Brno-Tuřany (ČHMÚ) [69]



Průměrné měsíční teploty vzduchu pro rok 2018, Brno-Tuřany (ČHMÚ) [69]